Numero 322
Giugno 1995
Anno XXVIII
Volume LIV

# I mutamenti ambientali e la scomparsa degli anfibi

*In molte aree del mondo rane, rospi e salamandre si stanno riducendo per cause diverse, che vanno dalla distruzione degli habitat all'assottigliamento della fascia di ozono*

di Andrew R. Blaustein e David B. Wake

Forse il fascino che su di noi esercitano le rane e gli altri anfibi ha origine nella nostra infanzia, con la scoperta dei girini e l'osservazione della loro metamorfosi. Ma oggi per un adulto l'interesse dovrebbe nascere piuttosto dall'osservazione di un altro tipo di cambiamento: in molte parti del mondo le popolazioni di anfibi stanno diminuendo e alcuni gruppi sono in via di totale scomparsa dai loro habitat. Tale diminuzione - riconosciuta per la prima volta nel 1990 come fenomeno globale - merita attenzione non solo per essere preoccupante in sé, ma anche perché le rane e i loro affini (soprattutto rospi e salamandre) possono essere ottimi indicatori delle condizioni ambientali.

Per diversi motivi gli anfibi sono preziose spie dello stato di salute del pianeta. Anzitutto, si trovano in intimo contatto con molte componenti del loro ambiente. Per esempio, allo stadio larvale le rane vivono in acqua, ma da adulte si spostano per lo più in ambiente subaereo. La loro pelle umida e delicata è abbastanza sottile da consentire un'adeguata respirazione; le loro uova prive di guscio sono a contatto diretto con il terreno, l'acqua e la luce solare. Le larve sono erbivore, gli adulti carnivori. Dal momento che gli anfibi sono direttamente collegati a molti elementi dell'ambiente, il loro stato di salute riflette l'effetto combinato di numerosi parametri indipendenti dell'ecosistema.

In secondo luogo, questi animali sono ottimi indicatori delle condizioni locali perché rimangono all'interno di aree abbastanza ristrette per tutta la loro vita. Ciò che oggi sta accadendo alle rane e ai loro parenti si verifica dove vive l'uomo, e potrebbe avere effetti anche sulla nostra specie.

Infine gli anfibi sono così diversificati che non si può prendere in considerazione come causa della loro diminuzione un singolo carattere proprio della loro classe; sospettiamo quindi che i fattori ambientali costituiscano in realtà la causa principale del loro declino. Gli anfibi si differenziano per colore, forma, comportamento; variano per dimensioni, capacità riproduttiva e densità delle popolazioni. Si trovano in molti ecosistemi e habitat, compresi deserti, praterie e foreste, dal livello del mare fino alle alte quote. Sebbene questi animali siano più abbondanti nelle regioni tropicali, sono comuni anche nelle zone temperate e si possono trovare perfino alle alte latitudini, come in Alaska e nel Canada settentrionale.

Quali fattori ambientali potrebbero essere all'origine di un così rapido declino di animali che sono riusciti a superare, nell'arco di centinaia di milioni d'anni, eventi responsabili dell'estinzione in massa di molte specie, dinosauri compresi? Le spiegazioni proposte sono tante quante le specie di anfibi in pericolo e vanno dalla distruzione dell'habitat a fluttuazioni naturali delle popolazioni.

Una o più di queste ipotesi sembrano poter spiegare la riduzione di molte popolazioni, ma non sempre le ragioni del declino sono chiare. In certi casi il danno può essere causato dalla interazione di molti piccoli elementi a scala regionale o anche mondiale. In particolare, un recente lavoro conclusosi la primavera scorsa ha portato alla sorprendente scoperta che la diminuzione dell'ozono nella stratosfera può aver danneggiato certe specie di anfibi in alcune parti del globo.

Il problema dell'ozono stratosferico è stato portato in primo piano da ricerche iniziate nell'Oregon, nel 1979, da uno di noi (Blaustein) assieme ai suoi studenti. Gli esperimenti, spesso effettuati a quote superiori a 1200 metri in regioni remote e indisturbate della Catena delle Cascate, hanno riguardato parecchie specie di anfibi. Gli esemplari studiati sono stati seguiti dallo stadio embrionale, attraverso la fase di girino, fino allo stadio adulto. Sebbene lo scopo fosse una semplice ricerca sul comportamento e sull'ecologia degli anfibi, sono emersi alcuni risultati inattesi.

*Il ruolo dei raggi ultravioletti*

È stata per esempio documentata la moria massiccia di uova fecondate di due specie: la rana della Catena delle Cascate (*Rana cascadae*) e il rospo del nord (*Bufo boreas*). Inoltre si è visto che, in un decennio, il numero di esemplari adulti di queste due specie era diminuito. Ipotizzando che la diminuzione delle rane e dei rospi adulti fosse dovuta alla sopravvivenza di poche uova fecondate, il gruppo ha iniziato a indagare le ragioni del fenomeno. Si è subito escluso che il chimismo delle acque in cui gli animali depongono le uova potesse esserne la causa: in laboratorio era infatti possibile allevare embrioni in campioni d'acqua di un lago dove si era verificata una moria. Per di più l'analisi chimica dei laghi e delle pozze nei quali era avvenuta una moria di uova non evidenziava particolari segni di inquinamento, né eccessi di acidità.

Alla fine degli anni ottanta si è manifestata una seconda possibile causa della moria di

**La radiazione ultravioletta, che riesce a superare una fascia di ozono stratosferico sempre più sottile, costituisce un problema evidenziato solo di recente per gli anfibi che depongono uova all'aperto. È stato dimostrato che la radiazione danneggia il DNA (*nel riquadro*) e provoca ingenti perdite di uova fecondate in almeno due specie della Catena delle Cascate, nell'Oregon, tra cui la rana della Catena delle Cascate (*Rana cascadae*), qui raffigurata. A sua volta la moria delle uova causa presumibilmente la diminuzione numerica delle popolazioni.**

**Le cause del declino degli anfibi sono diverse. Distruzioni dell'habitat come questo incendio della foresta pluviale brasiliana (*a sinistra*) costituiscono la minaccia più importante. Tra le altre cause si annoverano malattie, come l'infezione dovuta al fungo *Saprolegnia* (*qui sopra*)**

**e l'impiego alimentare delle cosce di rana. Il consumo di rane aveva raggiunto proporzioni enormi negli Stati Uniti all'inizio del secolo, prima che venissero adottate misure di salvaguardia. Anche l'inquinamento dei corsi d'acqua e dell'aria (*a destra*) minaccia gli anfibi.**

uova. È ormai stato ben documentato un assottigliamento della fascia di ozono stratosferico che normalmente impedisce alla maggior parte della radiazione ultravioletta solare di raggiungere il suolo. Queste osservazioni hanno indotto Blaustein e i suoi collaboratori a domandarsi se una maggiore esposizione delle uova alla radiazione ultravioletta potesse essere la causa dei problemi riproduttivi osservati; questo poteva verosimilmente spiegare perché molte delle specie di anfibi in declino vivessero in ambienti di montagna, dove le uova vengono deposte in acque aperte, spesso basse. Queste uova restano esposte per lungo tempo ai raggi solari, e quindi alla radiazione ultravioletta che attraversa la fascia di ozono.

Il gruppo di Blaustein ha ritenuto che una lunga esposizione alla radiazione ultravioletta potesse arrecare problemi alla rana della Catena delle Cascate e al rospo del nord poiché sapeva bene che i raggi ultravioletti possono danneggiare la vita vegetale e animale. In particolare, la cosiddetta radiazione ultravioletta B, con lunghezza d'onda compresa tra 280 e 320 nanometri, è estremamente nociva agli organismi viventi. Nell'uomo, per esempio, può inibire il sistema immunitario, provocare cataratta e favorire la formazione di melanomi. A metà degli anni settanta Robert C. Worrest, dell'Oregon State University, ha dimostrato in laboratorio che la radiazione ultravioletta B può effettivamente causare uno sviluppo anormale negli embrioni di anfibi.

Tuttavia pochi esperimenti avevano considerato quali siano le conseguenze della radiazione ultravioletta sugli anfibi o su altri animali in natura. Perciò Blaustein e colleghi si sono proposti di accertare se l'aumento di livello della radiazione ultravioletta B avesse un ruolo nella diminuzione delle popolazioni di anfibi osservata in natura. Per questo programma il gruppo ha incluso l'ecologa Susan C. Walls e i genetisti molecolari John B. Hays e Peter D. Hoffman, oltre agli specializzandi D. Grant Hokit e Joseph M. Kiesecker, tutti della Oregon State University.

Il programma di ricerche si è basato sulla conoscenza del meccanismo di azione della radiazione ultravioletta sul patrimonio genetico; quando il DNA assorbe l'energia della radiazione ultravioletta, i legami che rendono stabile la molecola si rompono e compaiono nuove strutture. Le alterazioni del DNA possono sconvolgere il funzionamento delle cellule portandole perfino alla morte; tuttavia molti organismi possiedono la capacità di riparare i danni arrecati al DNA dalla radiazione ultravioletta. Come parte del processo, alcuni di questi organismi - certe specie di alghe, di piante, di pesci, di anfibi e di marsupiali - attivano un enzima, la fotoliasi, che elimina le strutture danneggiate.

Misurando la quantità di fotoliasi prodotta nelle uova di diversi anfibi, i ricercatori hanno trovato non solo che i livelli variano da una specie all'altra, ma anche - cosa più importante - che le specie in declino sono generalmente quelle le cui uova hanno basso contenuto di fotoliasi e perciò dispongono di scarsa protezione dall'ultravioletto.

La specie con il contenuto maggiore di fotoliasi fra quelle studiate, la raganella del Pacifico (*Hyla regilla*), non è invece soggetta a riduzione della popolazione. Le sue uova contengono all'incirca il triplo di fotoliasi rispetto a quelle della rana della Catena delle Cascate e sei volte la quantità presente nelle uova del rospo del nord. Perciò gli embrioni di rana della Catena delle Cascate e quelli di rospo del nord non sembrano in grado di produrre abbastanza fotoliasi per neutralizzare gli effetti di una esposizione a livelli insolitamente alti di radiazione ultravioletta. Questa mancanza di protezione può a sua volta essere responsabile dell'elevata mortalità osservata nelle uova e spiegare perché queste due specie siano minacciate di estinzione in alcuni paesi.

Dopo aver preso atto della correlazione tra mancanza di protezione dalla radiazione ultravioletta e declino della popolazione, si trattava di trovare una prova del fatto che la radiazione ultravioletta fosse la reale causa del suddetto declino. Il gruppo ha raccolto uova appena deposte di rana della Catena delle Cascate, di rospo del nord, di raganella del Pacifico e di una specie di salamandra, *Ambystoma gracile*. Le salamandre, come gli altri tre anfibi, depongono in acque aperte e basse le loro uova fecondate e inoltre producono quantità irrisorie di fotoliasi.

### *Le uova esposte ai raggi ultravioletti non riescono a schiudersi*

Le uova sono state disposte sul fondo di recipienti. Su un terzo di essi è stata collocata una copertura di plastica trasparente (Mylar) in grado di proteggere le uova dalla radiazione ultravioletta B. Un secondo gruppo di contenitori è stato lasciato aperto, in modo che le uova fossero completamente esposte, mentre sul restante terzo è stata collocata una copertura trasparente in acetato, materiale che lascia passare la radiazione. Questo accorgimento serviva per garantire che i risultati osservati nei recipienti schermati non fossero dovuti alla semplice presenza di una qualsiasi copertura.

I membri del gruppo di ricerca hanno posizionato a caso un totale di 48 contenitori lungo le sponde di laghi e pozze, in diversi siti in cui ogni specie normalmente depone le uova. Gli esperimenti sulle uova di rana e di rospo sono stati eseguiti nella primavera del 1993 a quote relativamente alte - oltre i 1200 metri - nella Catena delle Cascate, mentre quelli sulle uova di *Ambystoma gracile* si sono svolti nel 1994 nelle colline pedemontane della Catena Costiera dell'Oregon, a circa 200 metri di quota. Lo studio è proseguito finché tutte le uova o sono morte o si sono schiuse (processo che dura una-due settimane a seconda delle condizioni meteorologiche).

Se l'incapacità di riparare i danni dovuti all'eccessiva esposizione alla radiazione ultravioletta fosse stata veramente la causa della moria di uova in numerose specie di anfibi, allora gli organismi che sintetizzavano livelli inferiori di fotoliasi avrebbero dovuto risultare svantaggiati. I risultati degli esperimenti sono stati molto netti. Più del 90 per cento delle uova di *Ambystoma gracile* esposte alla radiazione ultravioletta B è andato incontro a morte (rispetto al 45 per cento delle uova protette), come pure oltre il 40 per cento delle uova esposte di rospo del nord e di rana della Catena delle Cascate (contro il 10-20 per cento delle uova schermate). Viceversa quasi tutte le uova di raganella del Pacifico si sono schiuse con successo in tutte e tre le condizioni sperimentali.

Era quindi evidente che le uova degli anfibi in natura vengono danneggiate dall'esposizione alla radiazione ultravioletta B, e che questo fenomeno è con ogni probabilità determinante nel declino osservato delle popolazioni adulte. Non si sa con certezza se *Ambystoma gracile* sia in diminuzione ma, se questi esperimenti hanno un valore indicativo, vi sono buone probabilità che anche questa specie di anfibi sia a rischio.

Con quale meccanismo la radiazione ultravioletta porterebbe alla distruzione delle uova e degli embrioni degli anfibi? Un'altra ricerca di Blaustein e collaboratori ha fornito una parziale spiegazione del fenomeno. Risulta che dalla

## La diminuzione degli anfibi in Italia

In Italia, come nel resto del mondo, si assiste a una drastica riduzione delle popolazioni di anfibi, dovuta a diverse cause di natura antropica. In primo luogo va segnalata la distruzione delle zone umide, habitat elettivi degli anfibi, soggette a progressivi interventi di bonifica. A causa di ciò rischiano di scomparire molte specie italiane, come la rana agile (*Rana dalmatina*) e la rana di Lataste (*Rana latastei*), entrambe legate ai boschi planiziali, oggi in notevole regresso. Una citazione particolare merita il pelobate fosco (*Pelobates fuscus insubricus*), presente solo nella Pianura Padana, piuttosto diffuso fino a poche decine di anni fa e ora scomparso in molte zone; a tutt'oggi sono noti solo una quindicina di siti riproduttivi, talvolta molto distanti fra loro, e la specie è in serio pericolo di estinzione. Un altro problema deriva dall'impiego in agricoltura di grandi quantitativi di pesticidi, che mettono in serio pericolo le specie più sensibili all'inquinamento, come le raganelle o i tritoni, colpendo soprattutto le uova o gli stadi larvali. La scarsa resistenza agli agenti chimici deriva dalla permeabilità della pelle, attraverso la quale gli anfibi respirano e assorbono molte delle sostanze disciolte in acqua.

I due rospi italiani, il rospo comune (*Bufo bufo*) e il rospo smeraldino (*Bufo viridis*), stanno diminuendo di numero in molte zone, a causa della abitudine di compiere lunghe migrazioni per tornare al sito riproduttivo, attraversando spesso strade trafficate. Centinaia di questi anfibi vengono travolti dalle automobili, causando anche un serio pericolo per la circolazione a causa del fondo stradale reso viscido dagli esemplari morti. Alcuni studiosi e volontari si dedicano al salvataggio dei rospi, trasportando gli individui da una parte all'altra delle strade o creando sottopassaggi per gli animali. Infine non va sottovalutato il prelievo da parte dell'uomo, sia per scopi alimentari, sia per collezionismo; quest'ultimo ha già portato quasi all'estinzione di alcuni anfibi, come *Salamandra atra aurorae* e *Speleomantes ambrosii*.

*Stefano Scali*
collaboratore del Museo
di storia naturale di Milano

*Taudactylus acutirostris*
(Australia)
***causa sconosciuta***

*Rana muscosa*
(California)
***introduzione di pesci nell'habitat***

Rospo comune (*Bufo bufo*)
(Europa)
***causa sconosciuta***

*Atelopus varius*
(Costa Rica)
***causa sconosciuta***

Salamandra tigre (*Ambystoma tigrinum*)
(America Settentrionale)
***inquinamento, forse precipitazioni acide***

*Nyctimystes dayi*
(Australia)
***causa sconosciuta***

Rospo calamita (*Bufo calamita*)
(Europa centro-occidentale)
***causa sconosciuta***

Rospo del nord (*Bufo boreas*)
(Nordamerica occidentale)
***malattia legata a radiazione UV***

Rospo rosso (*Bufo periglenes*)
(Costa Rica, forse estinto)
***causa sconosciuta***

*Rheobatrachus silus*
(Australia, forse estinto)
***causa sconosciuta***

**Le specie di anfibi qui illustrate sono tra quelle attualmente in diminuzione o addirittura già estinte per motivi che sono oggetto di studi dettagliati. In molti casi le ragioni del declino rimangono misteriose. Insieme alla fotografia di ogni esemplare di una specie sono indicate le cause più plausibili della sua riduzione.**

fine degli anni ottanta un numero crescente di anfibi nell'Oregon sia stato infettato dal fungo *Saprolegnia*, che vive normalmente nei laghi e nelle pozze d'acqua. Si sa anche che questo fungo colpisce i vivai ittici, soprattutto quelli di salmoni e trote. Forse i pesci immessi nei laghi, infettati dal fungo, hanno contaminato le uova degli anfibi. Dal momento che la radiazione ultravioletta può ridurre la funzione immunitaria in molti animali, sembra ragionevole supporre che almeno in parte il danno sia dovuto a una diminuzione, indotta dalla radiazione ultravioletta, della capacità degli embrioni di opporsi all'infezione fungina.

A prescindere dal danno alle uova fecondate, la radiazione ultravioletta può contribuire a ridurre le popolazioni di anfibi diminuendo la disponibilità di insetti acquatici di cui si cibano rane e affini. Si sa che livelli elevati di radiazione ultravioletta uccidono larve di insetti e alghe acquatiche.

Il lavoro di ricerca effettuato nell'Oregon ha offerto indizi potenzialmente importanti sul mistero della scomparsa degli anfibi, ma rimangono ancora molte domande in sospeso. Quante uova non devono schiudersi perché la popolazione stessa inizi a ridursi? La radiazione ultravioletta danneggia la crescita dei girini che si raccolgono nelle acque basse? E può avere effetto sugli adulti che si crogiolano al sole? Due di noi stanno iniziando a mettere a fuoco questi problemi.

*La minaccia di distruzione degli habitat*

Per quanto preoccupante, l'aumento della radiazione ultravioletta non è la sola causa potenzialmente significativa della riduzione delle popolazioni di anfibi. Per esempio, sia nella foresta Monteverde del Costa Rica, solitamente immersa nella nebbia, sia nelle foreste pluviali australiane, gli anfibi vivono sotto la chioma degli alberi dove nascondono le uova. Ma anche qui molte specie risultano in diminuzione.

Uno di noi (Wake) ha incominciato a studiare le cause del declino delle popolazioni di certi anfibi già negli anni settanta, quando si sono notate le prime avvisaglie del problema. Si tratta di un tema di ricerca avvincente perché, sebbene la prova di una loro diminuzione numerica in diverse parti del mondo sia incontestabile, altrove gli anfibi sembrano prosperare. Questa situazione enigmatica ha indotto noi e altri ricercatori a esaminare attentamente le possibili ragioni del fenomeno.

Non esiste una spiegazione univoca, ma diverse cause sembrano importanti per un verso o per l'altro. Il deterioramento e l'alterazione dell'ambiente rappresentano con tutta probabilità le ragioni principali del declino degli anfibi. Come altri animali, essi sono minacciati dalla distruzione delle foreste e dalla bonifica delle zone umide. In realtà queste attività sono probabilmente responsabili del declino della maggior parte delle specie oggi in pericolo.

Un esempio eloquente di questo fenomeno è fornito da una recente ricerca condotta nel North Carolina occidentale, che ha dimostrato come il taglio di alcune foreste demaniali abbia causato un'enorme moria di salamandre. Sebbene la maggior parte delle specie coinvolte in questo caso abbia un areale relativamente ampio e non si trovi in pericolo di estinzione, l'esempio indica che molti anfibi delle regioni tropicali americane, africane e asiatiche possono correre rischi più gravi, dato che la loro distribuzione geografica molto limitata li rende particolarmente vulnerabili.

*L'inquinamento ha la sua parte*

In alcune parti del mondo anche gli elevati livelli di sostanze inquinanti potrebbero aver ridotto le popolazioni degli anfibi, sebbene i dati relativi agli effetti dell'inquinamento su questi animali siano piuttosto scarsi. Diversi studi fanno pensare che la pioggia e la neve acide, i fungicidi, gli erbicidi, gli insetticidi e i più svariati prodotti dell'industria chimica possano pregiudicare gravemente le capacità riproduttive e lo sviluppo degli anfibi. È noto che alcune sostanze di sintesi sono in grado di simulare l'attività di ormoni naturali; osservazioni condotte su uccelli, pesci e rettili indicano che queste sostanze possono provocare conseguenze gravi, quali la riduzione del numero di spermatozoi e danni ai genitali maschili.

Anche certe malattie - forse correlate all'inquinamento ambientale - sembrano mettere in pericolo alcune specie di anfibi. Per esempio, abbiamo detto prima che le uova della rana della Catena delle Cascate e quelle del rospo del nord sono altamente vulnerabili a *Saprolegnia* e che la predisposizione all'infezione fungina aumenta probabilmente con l'esposizione alla radiazione ultravioletta. Inoltre il compianto Arthur N. Bragg, mentre lavorava presso l'Università dell'Oklahoma, dimostrò che *Saprolegnia* è in grado di distruggere intere popolazioni di girini, sebbene questa scoperta sia stata ampiamente sottovalutata come causa della scomparsa degli anfibi.

Finora solo pochi studi hanno messo in relazione una malattia con l'estinzione di un'intera popolazione di anfibi. Tuttavia si è scoperto che il batterio *Aeromonas hydrophila* può aver provocato la scomparsa di diverse popolazioni di rospi del nord nel Colorado. Il batterio è molto contagioso ed è implicato anche nella morte di esemplari adulti di rane, rospi e salamandre in parecchie altre regioni.

Alcuni ricercatori ritengono che l'evidente declino delle popolazioni di anfibi rappresenti un fenomeno di fluttuazione naturale. Tuttavia diverse ricerche a lungo termine dimostrano che la diminuzione è stata più o meno continua negli ultimi 20-30 anni, a prova del fatto che, almeno per alcune popolazioni, sono in gioco fattori diversi.

Altre cause ancora possono spiegare casi isolati di diminuzione numerica degli anfibi. Alcune popolazioni, per esempio, possono diminuire in quanto decimate dall'uomo. In Francia la domanda di cosce di rana è impressionante: i francesi ne consumano da 3000 a 4000 tonnellate all'anno. Per una tonnellata di cosce si devono sacrificare circa 20 000 rane. E alla fine del secolo scorso la caccia a *Rana aurora* nell'Oregon e in California portò probabilmente la specie vicina all'estinzione.

Per ironia della sorte, negli Stati Uniti occidentali i tentativi di incrementare le popolazioni di anfibi probabilmente hanno creato problemi ancora più gravi agli anfibi autoctoni; questo esempio illustra un'altra possibile causa del loro declino numerico: l'introduzione di specie esotiche.

Per compensare la scarsità di *Rana aurora* nell'Oregon e in California è stata introdotta la rana toro (*Rana catesbeiana*). Nel nuovo habitat questo animale particolarmente vorace è entrato in competizione con gli anfibi autoctoni o li ha predati. Avendo notato che la rana toro era diventata particolarmente abbondante in alcune località dove le specie autoctone erano diminuite, molti ricercatori hanno recentemente sostenuto che la sua introduzione sia stata la causa principale del fenomeno. E almeno due studi in corso hanno stabilito una correlazione diretta fra l'introduzione della rana toro e la diminuzione delle specie autoctone.

Allo stesso modo l'introduzione di pesci in un ecosistema può danneggiare gli anfibi, soprattutto in zone dove le specie ittiche scarseggiano o sono completamente assenti. Nelle regioni meridionali della Sierra Nevada, in California, l'immissione di trote e salmoni nei torrenti ha provocato la scomparsa di *Rana muscosa*. Questi pesci danneggiano in modo diretto gli anfibi, poiché si cibano delle loro uova, dei girini e perfino degli esemplari adulti, ma hanno anche un effetto più ampio e potenzialmente più profondo.

Molte popolazioni separate di anfibi sono collegate tra loro da corsi d'acqua privi o quasi di pesci. Queste vie d'acqua sono importanti perché rane e affini, essendo estremamente vulnerabili ai cambiamenti dell'habitat, si affidano alla comparsa di occasionali individui migranti per ricostituire comunità decimate. La comparsa di nuove specie ittiche che può arrestare la migrazione tra le comunità di anfibi, impedendo alle popolazioni danneggiate di ricostituirsi.

*Conseguenze nocive*

La progressiva scomparsa degli anfibi rappresenta qualcosa di più che la semplice perdita di animali interessanti dal punto di vista estetico e comportamentale. Essi sono, infatti, membri importanti di molte comunità ecologiche e possono essere direttamente utili all'uomo. In alcuni ecosistemi gli anfibi sono i vertebrati più abbondanti, al punto che la loro scomparsa può seriamente alterare il funzionamento dell'intera comunità ecologica. Gli anfibi adulti cacciano diversi animali come zanzare, mosche, pesci, uccelli e addirittura piccoli mammiferi. Inoltre, le larve degli anfibi costituiscono una fonte alimentare per insetti acquatici, pesci, mammiferi e uccelli. Perciò la scomparsa di rane, rospi e salamandre ha ripercussioni in più punti della catena alimentare.

Dal punto di vista dell'uomo, gli anfibi rappresentano una miniera di sostanze di notevole interesse farmacologico che attendono di essere sfruttate pienamente. Sono state isolate centinaia di composti secreti dalla cute di questi animali e i biologi hanno appena incominciato a rendersi conto di quanto siano preziose queste sostanze. Alcune vengono già impiegate come analgesici e nel trattamento di traumi che vanno dalle ustioni all'infarto del miocar-

**CONSORZIO PER I SERVIZI TECNOLOGICI**
**tra i Comuni di MIRA-MIRANO-SPINEA Sede in Mirano (Ve)**

Ai sensi dell'art. 6 della Legge 25 febbraio 1987 n. 67, si pubblicano i seguenti dati relativi al bilancio preventivo 1995 è al conto consuntivo 1993 (1):

**1) Le notizie relative alle entrate ed alle spese sono le seguenti:**

**ENTRATE** (in milioni di lire)

| Denominazione | Previsioni di compet. da bilancio anno 1995 | Accertam. da conto consuntivo anno 1993 |
|---|---|---|
| Contributi e trasferimenti | 5.744 | 6.210 |
| (di cui dai consorziati) | (5.744) | (6.210) |
| (di cui dallo Stato) | | |
| (di cui dalle Regioni) | | |
| Altre entrate correnti | 2.187 | 585 |
| **Totale entrate di parte corrente** | 7.931 | 6.795 |
| Alienazione di beni e trasferimenti | | |
| (di cui dai consorziati) | | |
| (di cui dallo Stato) | | |
| (di cui dalla Regione) | | |
| Assunzione prestiti | 1.000 | 0 |
| **Totale entrate in conto capitale** | 1.000 | 0 |
| Partite di giro | 1.306 | 586 |
| Disavanzo | – | – |
| Avanzo applicato | 607 | – |
| **TOTALE GENERALE** | 10.844 | 7.381 |

**SPESE** (in milioni di lire)

| Denominazione | Previsioni di compet. da bilancio anno 1995 | Impegni da conto consuntivo anno 1993 |
|---|---|---|
| Correnti | 8.538 | 6.779 |
| Rimborso quote capitale per mutui in ammortamento | 0 | 0 |
| **Totale spese di parte corrente** | 8.538 | 6.779 |
| Spese di investimento | 0 | 0 |
| **Totale spese in conto capitale** | 0 | 0 |
| Rimborso prestiti diversi da quote capitale per mutui | 1.000 | 0 |
| Partite di giro | 1.306 | 586 |
| Avanzo | | 16 |
| **TOTALE GENERALE** | 10.844 | 7.381 |

**2) La classificazione delle principali spese correnti ed in conto capitale, desunta dal consuntivo, secondo l'analisi economica è la seguente** (in lire):

– Personale ........ L. 3.174.988.616
– Acquisto beni e servizi ........ L. 3.504.450.205
– Interessi passivi ........ L. 0
– Investimenti effettuati direttamente dall'Amministrazione ........ L. 0
– Investimenti indiretti ........ L. 0
– TOTALE ........ L. 6.679.438.821

**3) La risultanza finale a tutto il 31 dicembre 1993 desunta dal consuntivo è la seguente:**

– Avanzo di amministrazione dal conto consuntivo dell'anno 1993 ........ L. 763.919.488
– Residui passivi perenti esistenti alla data di chiusura del conto consuntivo dell'anno 1993 ........ L. 15.848.860
– Avanzo di amministrazione al 31 dicembre 1993 ........ L. 748.070.628
– Ammontare dei debiti fuori bilancio comunque esistenti e risultanti dalla elencazione allegata al conto consuntivo dell'anno 1993 (L. ........) ........ L. –

**4) Le principali entrate e spese per abitante sono le seguenti:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Entrate correnti** | L. 77.183 | **Spese correnti** | L. 77.006 |
| di cui: | | di cui: | |
| – contributi e trasferimenti | L. 70.538 | – personale | L. 36.064 |
| – altre entrate correnti | L. 6.645 | – acquisto beni e servizi | L. 39.806 |
| | | – altre spese correnti | L. 1.136 |

IL PRESIDENTE
dr. Sergio De Majo

(1) I dati si riferiscono all'ultimo consuntivo approvato.


dio; di altre si stanno studiando le proprietà antibatteriche e antivirali. Quando gli anfibi scompaiono, se ne vanno con loro molte potenziali cure per un gran numero di malattie.

La prova che la distruzione della fascia di ozono stratosferico può danneggiare gli embrioni degli anfibi mette in rilievo la complessità delle forze che possono portare alla scomparsa degli organismi viventi. Tuttavia è evidente che il degrado e lo sconvolgimento degli habitat rimangono la causa principale del declino degli anfibi nel mondo. Se le modificazioni dell'habitat si verificano abbastanza lentamente - come è successo per 3000 anni in Europa occidentale - gli anfibi possono adeguarsi e perfino adattarsi ai cambiamenti provocati dall'uomo. Ma molti dei mutamenti di cui abbiamo discusso, come l'aumento dei livelli di radiazione ultravioletta e di inquinanti nell'ambiente, sono avvenuti così velocemente che le specie con tempi di riproduzione lunghi spesso non riescono a tenere il passo.

Le specie di anfibi sono in numero ben maggiore di quanti siano i ricercatori che le studiano. Di quelle a noi note molte sono state viste una sola volta, in occasione appunto della loro scoperta. Il numero delle specie descritte continua a crescere velocemente, dell'1-2 per cento all'anno. Se, come riteniamo, gran parte di queste specie è a rischio, un gruppo meravigliosamente diversificato di animali sta per scomparire dal pianeta proprio mentre ci si accinge a studiarlo in tutti i suoi aspetti.

**BIBLIOGRAFIA**


WAKE DAVID B., *Declining Amphibian Populations* in «Science», 253, 23 agosto 1991.

BLAUSTEIN ANDREW R., WAKE DAVID B. e SOUSA WAYNE R., *Amphibian Declines: Judging Stability, Persistence, and Susceptibility of Population to Local and Global Extinction* in «Conservation Biology», 8, n. 1, 1 marzo 1994.

BLAUSTEIN ANDREW R., HOFFMAN PETER D., HOKIT D. GRANT, KIESECKER JOSEPH M., WALLS SUSAN C. e HAYS JOHN B., *UV Repair and Resistance to Solar UV-B in Amphibian Eggs: A Link to Population Declines?* in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 91, n. 5, 1 marzo 1994.

PECHMANN JOSEPH. H. K. e WILBUR HENRY M., *Putting Declining Amphibian Populations in Perspective: Natural Fluctuations and Human Impacts* in «Herpetologica», 50, n. 1, marzo 1994.

POUNDS J. ALAN e CRUMP MARTHA L., *Amphibian Declines and Climate Disturbance: The Case of the Golden Toad and the Harlequin Frog* in «Conservation Biology», 8, n. 1, 1 marzo 1994.

# Alla ricerca dei limiti dell'eliosfera

*Quattro sonde, ormai veterane dello spazio, stanno raggiungendo le estreme propaggini del sistema solare e molto presto varcheranno le frontiere che le separano dal mezzo interstellare*

di J. R. Jokipii e Frank B. McDonald

Lo splendore delle comete e delle aurore boreali ci ricorda che lo spazio nel sistema solare interno è tutt'altro che vuoto. Questa regione è permeata da veloci particelle cariche provenienti dal Sole, un impetuoso vento solare che spesso soffia in raffiche improvvise, arrivando ben oltre l'orbita della Terra, e persino oltre la regione percorsa dalle comete visibili. La valanga di particelle che si allontana dal Sole e il campo magnetico solare che essa trascina creano all'interno del mezzo interstellare una enorme cavità sferica che si estende molto al di là dell'orbita dei pianeti più lontani del sistema solare. Questa regione immensa, una bolla dominata dal Sole in mezzo alla vastità dello spazio, è chiamata eliosfera.

Si potrebbe pensare che al crescere della distanza dal Sole l'eliosfera si stemperi gradualmente in un confine indistinto dove le particelle del vento solare si mescolano a poco a poco con la brezza interstellare di polvere e gas. Ma non è affatto così: ai limiti dell'eliosfera esterna esiste una discontinuità improvvisa, in corrispondenza della quale si ritiene possa verificarsi una miriade di fenomeni fisici affascinanti. A tutt'oggi, però, non sono state compiute osservazioni dirette dei confini esterni dell'eliosfera, e quindi è necessario affidarsi a estrapolazioni, teorie o elucubrazioni pure e semplici sulla sua natura. Non sappiamo neppure, neanche approssimativamente, a quale distanza dal Sole si trovi questa frontiera. Ma la nostra ignoranza riguardo alle lontane propaggini dell'eliosfera potrebbe avere gli anni contati, dato che presto alcune sonde spaziali supereranno finalmente questa barriera che ci separa dallo spazio interstellare.

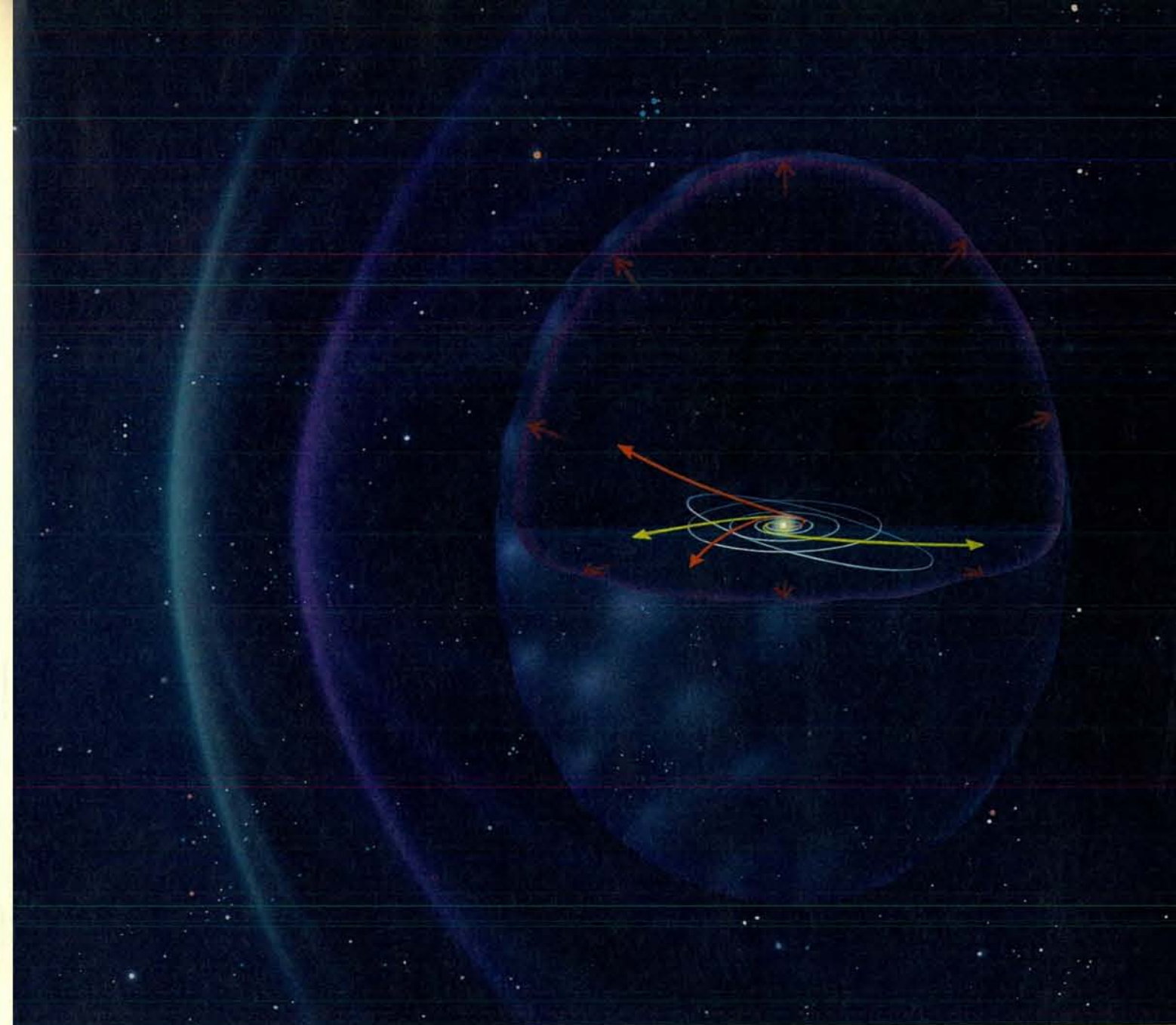
Oltre le orbite di Nettuno e di Plutone, alcuni veicoli spaziali si stanno infatti dirigendo verso i limiti estremi del sistema solare. Questa piccola flotta scientifica comprende *Pioneer 10* e *11* e *Voyager 1* e *2*, lanciati tutti una ventina di anni fa. Un ipotetico occupante di queste sonde che oggi si voltasse a guardare indietro scoprirebbe che il Sole è ancora l'oggetto più luminoso del cielo, ma lo vedrebbe oltre 1000 volte meno brillante di quanto non appaia dalla Terra. Eppure, persino a queste enormi distanze, le sonde sono ancora ben all'interno dell'eliosfera. Gli strumenti di bordo continuano a registrare perturbazioni che hanno origine alla superficie del Sole e si propagano verso l'esterno a circa 400 chilometri al secondo, impiegando diversi mesi, nonostante la velocità elevatissima, per raggiungere le sonde.

La missione originaria delle sonde Pioneer e Voyager - studiare i pianeti giganti Giove, Saturno, Urano e Nettuno - rimarrà tra i trionfi dell'esplorazione spaziale, ma il fatto che tutte e quattro funzionassero ancora perfettamente dopo i famosi incontri ravvicinati con i pianeti e l'interesse sempre crescente per il comportamento complesso e dinamico del vento solare a grande distanza dalla nostra stella hanno ispirato una seconda missione di grande importanza per questi gioiellini scientifici: studiare le regioni più remote dell'eliosfera e la loro interfaccia col mezzo interstellare. Il successo di questa nuova missione dipenderà non solo dalle possibilità tecniche delle sonde e dai sistemi di controllo a terra, ma anche dalla natura dell'eliosfera stessa.

## L'eliosfera esterna

Fu Eugene N. Parker dell'Università di Chicago il primo a descrivere, circa trent'anni fa, la struttura del vento solare e dell'eliosfera in una serie di rivoluzionari articoli teorici. Le osservazioni successive hanno confermato la struttura da lui prevista, almeno fino alla posizione della sonda più lontana, *Pioneer 10*. È stato dimostrato che il vento solare, allontanandosi radialmente dal Sole, porta con sé il «marchio» dell'atmosfera solare: alcune parti della stella emettono vento ad alta velocità in forma di ampi getti centinaia di chilometri al secondo più veloci del vento normale. Se il Sole fosse immobile, questi getti formerebbero semplici raggi rettilinei ma, dal momento che esso ruota ogni 27 giorni, i flussi veloci che hanno origine nella sua regione equatoriale possono sorpassare quelli più lenti che provengono da aree limitrofe della superficie. A volte una configurazione simile si mantiene per parecchie rotazioni solari, dando origine a regioni di spazio dove l'interfaccia tra flussi di plasma solare aventi diverse velocità assume una forma a spirale. Queste irregolarità ruotano di conserva con il Sole e per questo motivo si chiamano regioni di interazione corotanti.

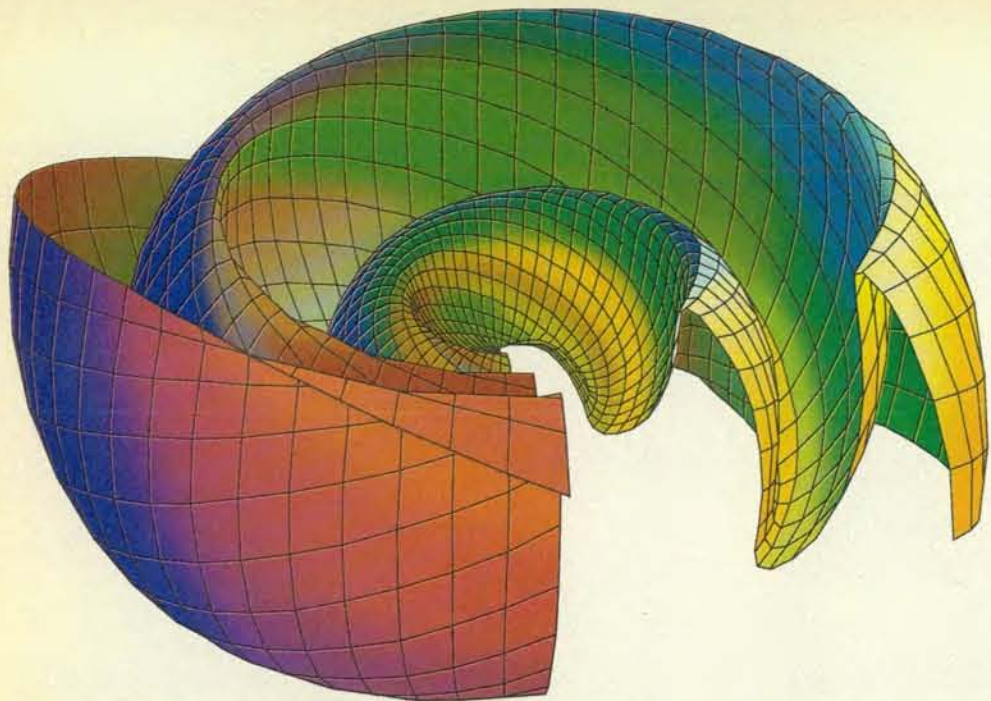
Oltre a ciò, alcune parti dell'atmosfera solare possono emettere «sbuffi» irregolari che si propagano in forma di disturbi transitori del vento. Di tanto in tanto, infine, gigantesche eruzioni sul Sole producono onde esplosive che sconvolgono l'andamento normale del vento solare.

Le svariate interazioni del plasma che costituisce il vento solare producono onde d'urto, che riscaldano il vento stesso e generano particelle di alta energia. Le regioni di interazione corotanti e le onde d'urto a esse associate rappresentano una caratteristica importante del vento solare fino a una distanza di oltre 10 unità astronomiche. Più oltre esse si fondono tra di loro, dando vita a regioni di interazione più ampie che arrivano fino alle propaggini estreme dell'eliosfera.

**L'eliosfera è costituita dalla parte di spazio dominata dal vento solare. Vicino ai suoi confini, il plasma solare diretto verso l'esterno (*frecce rosse*) è deviato dal flusso di gas interstellare, formando l'eliopausa (*in viola*); prima, però, esso rallenta bruscamente dando origine a un'onda d'urto terminale sferoidale. Nel gas interstellare, per il moto del sistema solare nella Galassia, potrebbe formarsi un'onda d'urto di prua (*in bianco*). I dati trasmessi da Pioneer (*le traiettorie sono indicate con frecce gialle*) e Voyager (*frecce arancioni*) dovrebbero chiarire ciò che accade ai confini dell'eliosfera.**

## Il campo magnetico interplanetario

Nella struttura a correnti dell'eliosfera è contenuto un campo magnetico interplanetario la cui interazione con il vento solare può essere piuttosto complessa; il suo comportamento può però essere visualizzato almeno in parte ricorrendo al concetto ben noto di linee di forza magnetiche e alle proprietà che queste conferiscono al vento solare in via di espansione.

Poiché il plasma del vento solare è un buon conduttore elettrico e l'energia cinetica del flusso è molto maggiore dell'energia del campo magnetico, è possibile considerare le linee di forza presenti nell'eliosfera come se fossero in moto con il vento solare, in pratica «congelate» al suo interno. Questo flusso magnetico congelato conferisce al plasma rarefatto una maggiore pressione e viscosità; nei plasmi, infatti, queste caratteristiche derivano dalle forze magnetiche, non da quelle molecolari come nei fluidi più densi. Quindi l'eliosfera contiene un groviglio di linee di forza stirate per effetto del vento solare in un'enorme voluta, che fino a tempi recenti è rimasta pressoché inesplorata.

Le prime osservazioni indicavano che le linee di forza del campo magnetico assumono in alternanza due orientazioni opposte al variare della longitudine solare, puntando o verso il Sole o verso l'esterno del sistema solare. La prima occasione di misurare il campo magnetico a latitudini eliografiche relativamente elevate si ebbe nel 1974, quando *Pioneer 11* deviò dal piano dell'eclittica sfruttando la quantità di moto fornitagli dall'intensa attrazione gravitazionale di Giove. Quando *Pioneer 11* e poi *Voyager 1* raggiunsero la latitudine eliografica di 16 gradi nord e

**Per effetto dei campi magnetici di verso opposto che si trovano al di sopra e al di sotto dell'equatore magnetico del Sole, nel vento solare si forma un foglio di corrente neutra. Durante il ciclo solare, l'inclinazione del piano equatoriale magnetico cambia con la variazione dell'attività solare. Questa inclinazione, combinata con il movimento di rotazione del Sole, dà origine a una geometria a spirale del foglio (rappresentata qui in maniera idealizzata), via via che il vento solare trasporta verso l'esterno il campo magnetico «congelato».**

scoprirono che il campo magnetico era quasi sempre diretto verso l'esterno, la sorpresa fu grande (nonostante che Michael Schulz della Aerospace Corporation lo avesse previsto). Edward J. Smith del Jet Propulsion Laboratory di Pasadena, in California, ne dedusse che le sonde rilevassero campi magnetici trasportati dal vento solare e che, a latitudini elevate, quest'ultimo puntasse in direzione opposta al Sole.

Nel 1976 le missioni Pioneer e Voyager dimostrarono che il campo magnetico solare era strutturato in modo tale che nell'emisfero boreale le linee di forza puntavano in generale verso l'esterno, mentre in quello australe erano dirette verso il Sole. Dato che la polarità del campo solare cambia ogni 11 anni (in corrispondenza del massimo di attività solare), si stabilisce un ciclo magnetico con un periodo di 22 anni. Come previsto, nel 1986 le due sonde rilevarono che il campo solare boreale si era invertito e puntava verso l'interno.

Nell'eliosfera la zona di transizione tra campi magnetici diretti verso l'esterno e campi diretti verso l'interno è una superficie molto sottile e corrugata che il vento solare allontana dal Sole formando un grande foglio di corrente interplanetario. La rotazione solare torce quest'ultimo in modo tale che le sue increspature si dispongono lungo le linee di forza a spirale e ruotano insieme con il Sole. Vicino al piano equatoriale solare le sonde rilevano campi magnetici diretti in alternanza verso l'interno o verso l'esterno via via che il foglio di corrente le supera ruotando nello spazio. Il numero di increspature è minore durante i minimi dell'attività solare, che si verificano ogni 11 anni e coincidono con una scarsità di macchie solari. Durante i massimi di attività solare invece la geometria del foglio diventa tanto complessa che la sua struttura normale è completamente irriconoscibile.

In qualunque configurazione, la struttura del campo magnetico quale si presenta all'origine, sulla superficie solare, raggiunge i margini esterni dell'eliosfera, trasportata dal vento solare, in circa un anno. Nel corso di questo periodo le correnti di plasma veloci continuano a fondersi con quelle più lente, dando origine a regioni in cui la densità del plasma e l'intensità del campo magnetico sono più elevate. La struttura a grande scala del vento solare e del campo magnetico si conserva nelle sue linee fondamentali sino a una distanza dal Sole per ora sconosciuta, ma comunque considerevole.

Nel suo cammino il vento solare si espande in un volume sempre maggiore, fino a che il plasma è talmente diluito da non riuscire più a opporsi alla modesta pressione del mezzo interstellare locale. Il vento non rallenta gradualmente a questo punto, ma lo fa in maniera improvvisa e violenta, perché la sua velocità è maggiore di quella alla quale una perturbazione si può propagare al suo interno.

Questo comportamento è imposto dai princìpi fondamentali del moto supersonico dei fluidi. Perché la velocità del flusso diminuisca gradualmente, la materia situata in testa deve poter segnalare a quella che la segue che occorre rallentare. Questi segnali devono propagarsi nel mezzo tramite onde sonore; dato che queste ultime, però, non possono risalire un flusso in moto supersonico, il fluido in arrivo cozza contro quello che lo precede, dando origine a un'onda d'urto. Il fenomeno è analogo a quanto accade durante un tamponamento a catena su un'autostrada, quando le automobili che seguono non riescono a rallentare abbastanza rapidamente da evitare di urtare quelle che le precedono.

Ci si aspetta che l'onda d'urto terminale del vento solare sia irregolare e turbolenta, proprio come un tamponamento a catena. Nell'attraversare la zona di collisione, il gas del vento solare dovrebbe diminuire la propria velocità diretta verso l'esterno fino a circa un quarto del valore originale. Parte dell'energia cinetica del vento viene convertita in calore, e questo processo fa salire la temperatura del gas interstellare fino a oltre un milione di kelvin. Un'altra parte di questa energia viene impiegata per comprimere il campo magnetico: si prevede che l'intensità di quest'ultimo quadruplichi il proprio valore all'interno dell'onda d'urto. Al confine, quindi, dove la velocità del vento solare viene convertita in calore e turbolenza, si prevede di trovare un gigantesco fronte d'urto sferoidale, dalla struttura complessa ma ancora piuttosto misteriosa.

*La testimonianza dei raggi cosmici*

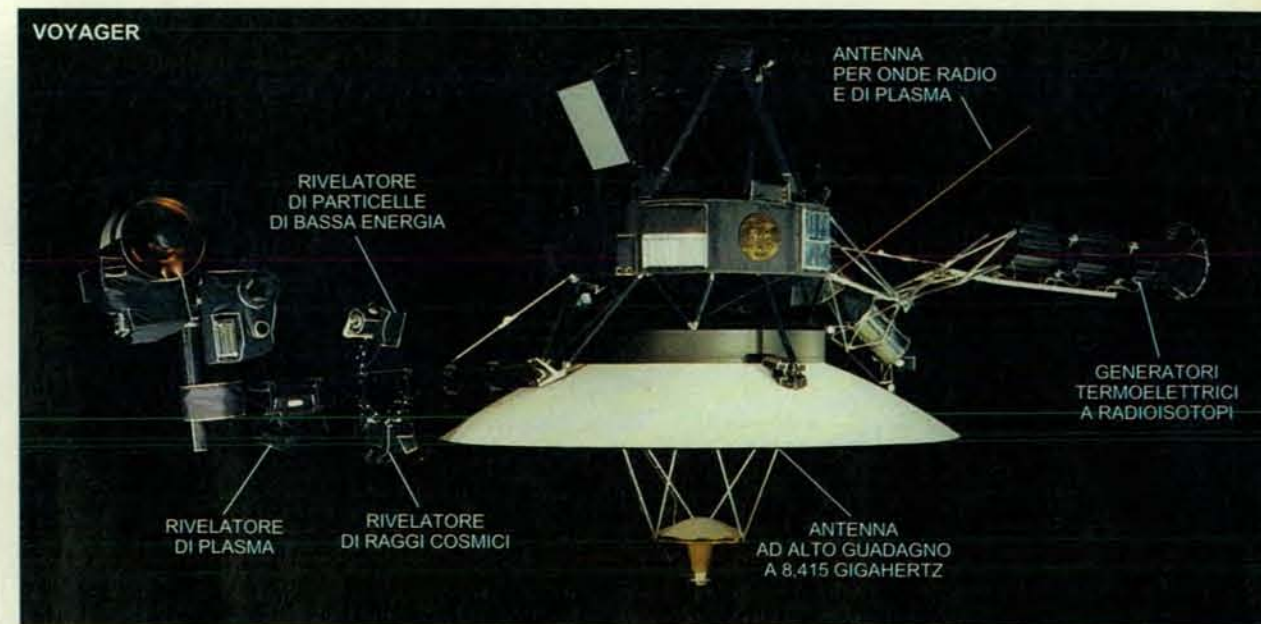
Prima che le sonde permettessero di compiere misurazioni dirette, ci si affidava soprattutto allo studio dei raggi cosmici per fare ipotesi sulla natura dell'eliosfera esterna. I raggi cosmici galattici sono particelle subatomiche (elettroni, protoni, tutti i nuclei pesanti dall'elio all'uranio, positroni e pochi antiprotoni) che si muovono a velocità prossima a quella della luce e sembrano riempire tutto l'universo. La loro presenza ubiquitaria è dimostrata dai raggi gamma di alta energia e dalle onde radio che essi generano e che possono essere rilevati sulla Terra. Si ritiene che all'interno della Galassia i raggi cosmici si formino nelle zone dove le onde d'urto prodotte dalle esplosioni di su-



## Sonde costruite per andare lontano

Le missioni di esplorazione dello spazio esterno pongono difficoltà tecniche significative alla progettazione di sonde spaziali, soprattutto per quanto riguarda il peso, la potenza e le comunicazioni. Le sonde Pioneer dovevano non solo sfuggire alla gravità terrestre, ma anche avere potenza sufficiente a raggiungere Giove in non più di due anni di viaggio. La soluzione venne fornita dall'impiego di un razzo ausiliario di potenza elevata e dalla riduzione al minimo del peso delle sonde: *Pioneer 10* pesava appena 250 chilogrammi. Anche una fonte affidabile di energia elettrica era essenziale: lontano dal Sole l'unica scelta possibile era quella dei generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG) che sfruttano il decadimento di materiale radioattivo. Ciascuna sonda Pioneer ha quattro RTG che inizialmente producevano un totale di 155 watt; la vita operativa di questi veicoli dipenderà probabilmente in ultima analisi dal decadimento radioattivo del combustibile di ossido di plutonio e dal deterioramento degli elementi di conversione all'interno di ciascun RTG.

Le sonde Voyager furono progettate a metà degli anni settanta sulla scorta delle esperienze raccolte dalle precedenti missioni Pioneer. Un veicolo di lancio più potente permise di impiegare sonde più pesanti (825 chilogrammi) e più complesse: il progetto dei Voyager prevedeva calcolatori di bordo di considerevole potenza, una piattaforma sperimentale capace di effettuare puntamenti di precisione e unità RTG migliorate che al lancio fornivano 470 watt. La raffinatezza e la flessibilità dei Voyager sono dimostrate dalle notevoli modifiche che è stato possibile compiere durante il volo per preparare *Voyager 2* al suo incontro con Urano, che non era stato previsto al momento della partenza (si veda l'articolo *I problemi tecnici del volo di* Voyager 2 *verso Urano* di Richard P. Laeser, William I. McLaughlin e Donna M. Wolff in «Le Scienze» n. 221, gennaio 1987).

Per le comunicazioni con la Terra le sonde Pioneer e Voyager recano a bordo una grande antenna. Le sonde Pioneer comprendono un'antenna parabolica da 2,7 metri, un poco più piccola di quella da 3,7 metri che si trova sui Voyager. L'antenna dei Pioneer ruota intorno all'asse della sonda, che rimane puntato verso la Terra grazie all'uso sporadico di piccoli propulsori di controllo. Le sonde Voyager non girano

su se stesse, ma hanno stabilizzatori su tutti e tre gli assi che consentono di mantenere l'antenna ad alto guadagno puntata verso antenne giganti che si trovano a Terra.

Le tre sedi della Deep Space Network della NASA (in California, Australia e Spagna) sono state fondamentali per le missioni Pioneer e Voyager. Nei 20 anni successivi al lancio di *Pioneer 10* il Jet Propulsion Laboratory di Pasadena, in California, ha potenziato notevolmente il sistema, aggiungendo nuovi ricevitori e aumentando le dimensioni delle antenne. Questi miglioramenti non riescono però a compensare il progressivo indebolimento dei segnali dovuto alla distanza. Per garantire una maggiore affidabilità, la velocità totale di trasmissione dei dati da *Pioneer 10* è stata abbassata fino al limite minimo di 16 bit al secondo, velocità paragonabile a quella della trasmissione di messaggi con l'alfabeto Morse. Le maggiori dimensioni dell'antenna dei Voyager e la frequenza di trasmissione più elevata permettono di impiegare le antenne da 34 metri della Deep Space Network e di comunicare a 160 bit al secondo.

pernova accelerano particelle fino a energie estremamente elevate. Inoltre anche il Sole, durante i periodi di maggiore attività, riesce a produrre quantità significative di raggi «cosmici» di energia inferiore.

L'eliosfera è pervasa perennemente dai raggi cosmici solari. Queste particelle possono propagarsi controcorrente nel plasma solare grazie alla loro velocità estremamente elevata e alla presenza di irregolarità nel campo magnetico. Dato che possiedono una carica elettrica, le particelle seguono traiettorie strettissime intorno alle linee di forza, e pertanto tendono anch'esse a uscire dall'eliosfera assieme al flusso magnetico congelato. In generale il vento solare funge da modulatore dell'intensità dei raggi cosmici che arrivano sulla Terra, intralciando il loro cammino verso l'eliosfera interna. Questo sbarramento è efficace soprattutto alle basse energie: i raggi cosmici di energia elevata si propagano quasi senza intralcio. Dato che la percentuale di raggi cosmici esclusi dall'eliosfera interna varia al variare dell'attività solare, anche la loro intensità segue un ciclo di 11 anni, con il massimo in corrispondenza del minimo di attività solare.

I raggi cosmici galattici attraversano l'eliosfera esterna e quindi forniscono informazioni preziose su questa regione inesplorata. Gran parte delle nostre conoscenze sulle lontane frontiere del sistema solare è stata ottenuta facendo il confronto tra le osservazioni e i modelli della propagazione dei raggi cosmici attraverso l'eliosfera. Per esempio, i dati inviati dalle quattro sonde hanno dimostrato che la velocità con cui aumenta l'intensità dei raggi cosmici galattici al crescere della distanza dal Sole è molto inferiore ai valori previsti. Questo risultato indica che l'eliosfera è più grande di quanto non si prevedesse prima del lancio delle sonde Pioneer e Voyager.

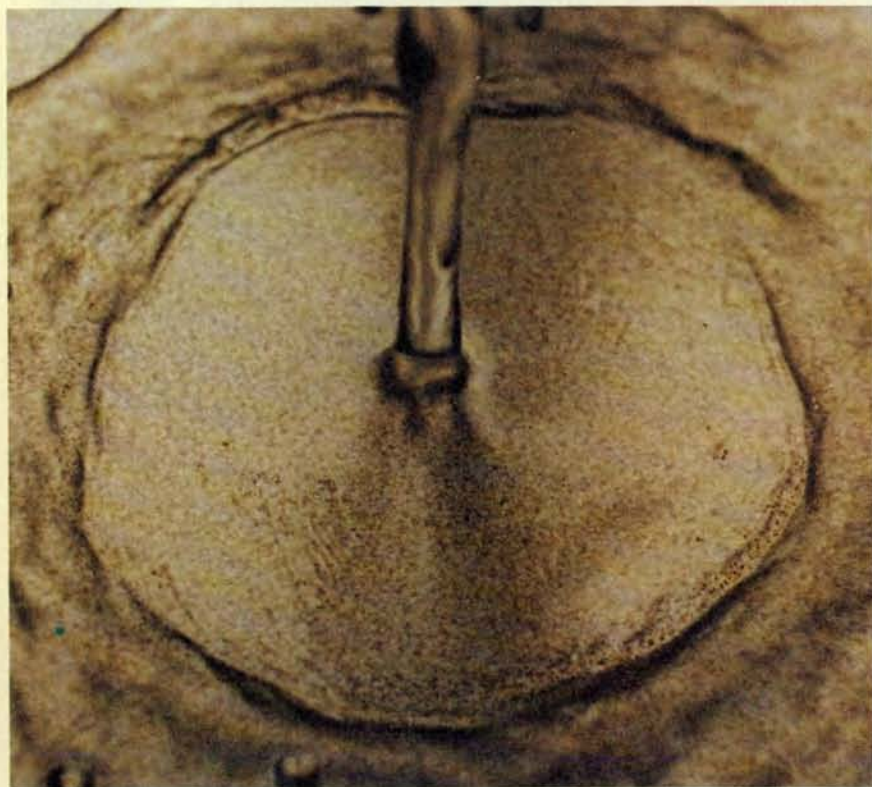
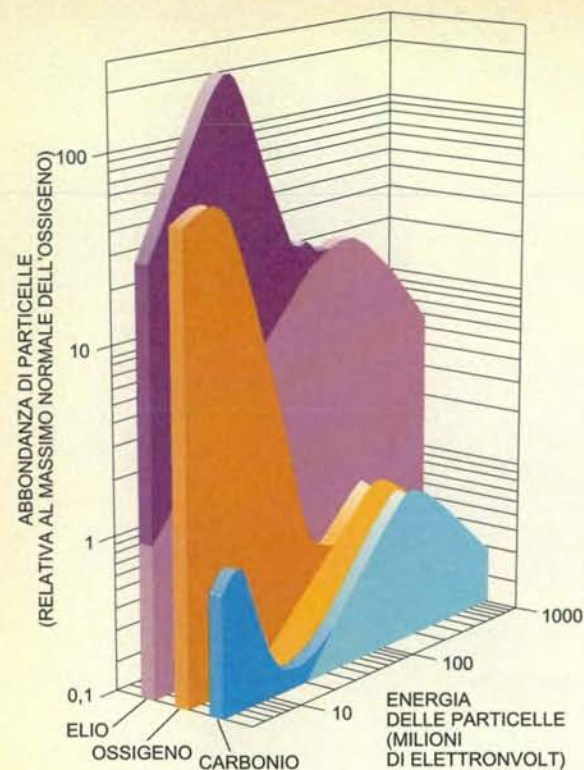
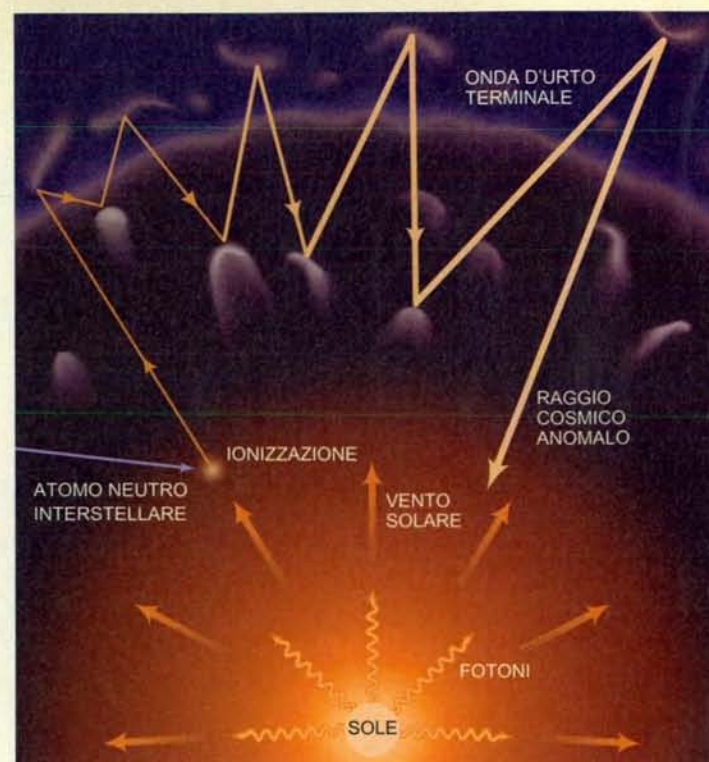
*Raggi cosmici anomali*

All'inizio degli anni settanta, mentre i Pioneer procedevano verso Giove, rivelatori collocati su diverse altre sonde individuarono nei raggi cosmici una componente imprevista: i raggi cosmici costituiti da nuclei di elio, azoto, ossigeno, neon, argo e idrogeno sono più abbondanti del previsto alle basse energie. Le osservazioni delle sonde Pioneer e Voyager indicano che l'intensità di questi raggi cosmici, anomali per composizione e spettro di energia, aumenta con la distanza dal Sole.

Da dove viene questa componente misteriosa? Studi condotti negli ultimi vent'anni hanno delineato un quadro affascinante e convincente di come abbiano origine questi raggi cosmici, anche se la validità della teoria non è stata ancora dimostrata appieno.

Nel 1974 Lennard A. Fisk, Benzion Kozlovsky e Reuven Ramaty, mentre lavoravano al Goddard Space Flight Center della National Aeronautics and Space Administration, proposero che questa componente anomala avesse origine da atomi neutri dello spazio interstellare. Mentre l'eliosfera attraversa il gas interstellare, gli atomi neutri, che non risentono dei campi magnetici o di altre forze all'interno del plasma, fluiscono liberamente nell'eliosfera interna. Quelli che passano vicino al Sole vengono ionizzati dalla radiazione solare o dal vento solare stesso e, una volta assunta una carica elettrica, diventano preda delle linee di forza associate al vento, che li trasportano via. Fisk e colleghi avanzarono l'ipotesi che fosse una successiva accelerazione a energie più elevate a trasformare questi ioni nei raggi cosmici anomali.

Questa proposta si basava sulla constatazione che nella componente anomala è pressoché assente il carbonio; dato che nello spazio interstellare questo elemento è quasi completamente ionizzato, è possibile spiegarne l'assenza nei raggi cosmici anomali supponendo che questi derivino da atomi neutri. Osservazioni condotte di recente in vicinanza della Terra da varie missioni spaziali hanno dimostrato che l'ossigeno (e presumibilmente anche gli altri nuclei) della componente anomala è ionizzato una volta. Questo risultato corrobora l'ipotesi di Fisk e collaboratori: i nuclei atomici che costituiscono i raggi cosmici provenienti da una sorgente vicina (interna all'eliosfera) riescono a conservare alcuni elettroni, mentre i raggi cosmici normali vengono completamente ionizzati durante il loro passaggio attraverso la Via Lattea.

Ma in che modo questi ioni appena formati sono stati accelerati fino alle energie che si osservano? Nel corso degli anni settanta vennero avanzate diverse ipotesi, ma nessuna riuscì a prevedere l'aumento costante di intensità della componente anomala registrato dalle sonde Pioneer e Voyager via via che si avvicinavano all'eliosfera esterna. Poi, nel 1981, uno di noi (Jokipii), insieme con Mark E. Pesses e David Eichler, entrambi a quel tempo all'Università del Maryland, propose che l'accelerazione degli atomi ionizzati una volta avvenga in corrispondenza dell'onda d'urto terminale. Le onde d'urto nel plasma possono imprimere una accelerazione alle particelle cariche, e questa zona sembrava una sede probabile per i processi che forniscono ener-

**Un'onda d'urto terminale può essere osservata nell'acqua che scorre in un lavandino. All'inizio l'acqua si allarga verso l'esterno più velocemente di quanto le onde si propaghino attraverso di essa; perciò il fluido che si trova al confine non riesce a segnalare a quello che lo segue che il suo moto sta rallentando. Dove le due componenti, veloce e lenta, del fluido si scontrano, si forma un fronte d'urto. Il confine dell'eliosfera, in corrispondenza dell'onda d'urto terminale, dovrebbe con ogni probabilità presentarsi irregolare e turbolento come il suo corrispondente idraulico.**

**Le particelle dei raggi cosmici presentano normalmente una distribuzione di energia priva di variazioni improvvise (*a sinistra*), ma alcuni nuclei sono stranamente abbondanti a basse energie (*colori più scuri*). Questa anomalia è generata da particelle neutre dello spazio interstellare che fluiscono nell'eliosfera, si ionizzano e si propagano di nuovo verso l'esterno per convezione. Le particelle accelerano e assumono energie più elevate interagendo con le irregolarità del campo magnetico su entrambi i lati del fronte d'urto. Le particelle accelerate tornano verso il Sole e vengono rilevate come raggi cosmici anomali.**

gia ai raggi cosmici anomali, in quanto contiene l'onda d'urto più intensa e longeva di tutta l'eliosfera. Da allora, modelli particolareggiati al calcolatore hanno dimostrato che quasi tutte le caratteristiche osservate della componente anomala derivano in maniera naturale da questa ipotesi.

### *Osservazioni del fronte d'urto*

Donald A. Gurnett e William S. Kurth dell'Università dello Iowa hanno raccolto indizi importanti sulla natura della regione dove si forma l'onda d'urto terminale. Fin dal 1983 essi hanno registrato impulsi di rumore radio a bassa frequenza (due-tre chilohertz) tramite i rivelatori a bordo delle due sonde Voyager. I segnali continuano per parecchi mesi e poi si spostano a frequenze via via più alte. Nel luglio 1992 questi studiosi osservarono l'inizio di un evento radio particolarmente intenso e notarono che si era verificato oltre 400 giorni dopo un periodo di attività solare estremamente energica; l'andamento temporale era identico a quello di un altro grande impulso radio verificatosi nel 1983. È probabile che questi segnali radio così peculiari si producano appena oltre l'onda d'urto terminale; insieme con i raggi cosmici anomali essi forniscono su questa grande frontiera inesplorata indizi che suscitano straordinaria curiosità.

Via via che le sonde Pioneer e Voyager si allontanano dal Sole, diventa sempre più probabile che incontrino presto l'onda d'urto terminale. Le prime stime, basate su quanto si sapeva allora del mezzo interstellare, collocavano l'onda d'urto in un intervallo di distanze compreso tra 75 e 150 unità astronomiche dal Sole, ma i dati finora raccolti dalle sonde sembrano indicare che essa è notevolmente più vicina; può darsi quindi che una o più delle sonde raggiunga l'onda d'urto entro i prossimi dieci anni.

Gli scienziati della NASA hanno quindi fatto preparativi per garantire che durante l'attraversamento del fronte d'urto vengano eseguite le misurazioni opportune. In effetti gli studiosi ritengono che, con un po' di fortuna, potranno avere più di un'occasione per osservare il fronte dato che questo, per effetto della turbolenza del vento solare, si sposta avanti e indietro, forse quanto basta per dar luogo a diversi attraversamenti da parte di ciascuna sonda. Una volta che i veicoli avranno finalmente superato la frontiera, il vento solare si placherà e per la prima volta sarà possibile osservare direttamente il mezzo interstellare.

Sarà già il XXI secolo quando le quattro sonde, dopo aver rilevato le condizioni fisiche dell'eliosfera esterna e dell'onda d'urto terminale, continueranno il loro viaggio verso le stelle. *Pioneer 10* dovrebbe rimanere operativo fino al volgere del secolo (quando si troverà a una distanza di 70 unità astronomiche), mentre *Voyager 2* potrà resistere fino al 2015 circa, raggiungendo 130 unità astronomiche di distanza. Dopo di che, quando ogni possibilità di controllo e di comunicazione si sarà interrotta, le sonde continueranno a seguire per migliaia e migliaia di anni la loro traiettoria attraverso la Galassia, come minuscoli messaggi in bottiglia gettati in un mare infinito.

### BIBLIOGRAFIA

SUESS STEVEN T., *The Heliopause* in «Reviews of Geophysics», 28, n. 1, febbraio 1990.

GRZEDZIELSKI S. e PAGE D. E. (a cura), *Physics of the Outer Heliosphere*, COSPAR Colloquia Series, vol. 1, Pergamon Press, 1990.

HUFBAUER KARL, *Exploring the Sun*, Johns Hopkins University Press, 1991.

MARSCH E. e SCHWENN R. (a cura), *Solar Wind Seven*, COSPAR Colloquia Series, vol. 3, Pergamon Press, 1992.

# Macchine che apprendono tramite suggerimenti

*I processi di apprendimento artificiale possono essere notevolmente migliorati traendo vantaggio dalle informazioni contenute nei cosiddetti «suggerimenti intelligenti»*

di Yaser S. Abu-Mostafa

«Perché un elefante è grande, scuro e ha una strana forma?» «Perché se fosse piccolo, bianco e rotondo sarebbe un'aspirina.» Questa risposta può sembrare bizzarra a orecchie umane, ma può rivelarsi ricca di informazioni per un calcolatore che tenti di identificare oggetti come gli elefanti e le aspirine. Certe conoscenze, che di solito noi diamo per scontate, alle macchine non appaiono affatto ovvie se non sono esplicitate in modo articolato. Per le macchine l'apprendimento è tutt'altro che semplice.

Nonostante le difficoltà, l'apprendimento artificiale è oggi una delle tecnologie a sviluppo più rapido. Negli ultimi anni si è avuta una vera e propria esplosione delle applicazioni: dalla lettura automatica dei codici postali scritti a mano alla previsione delle richieste di posti per i viaggi aerei. Anzi, è probabile che quando avete ricevuto l'ultima carta di credito dalla vostra banca, l'approvazione sia stata concessa da una macchina che ha imparato a valutare in modo automatico i rischi legati alla concessione delle carte. E l'apprendimento artificiale è destinato a un'ulteriore espansione.

Quando si crea un programma per svolgere un dato compito, è quasi sempre necessario comprendere a fondo il problema e la sua soluzione. L'apprendimento artificiale presenta quindi un vantaggio fondamentale: anziché allestire un programma *ad hoc*, ci si può limitare a fornire esempi, addestrando un calcolatore versatile che poi continua ad apprendere per conto proprio.

Per esempio un sistema di apprendimento automatico per la concessione di carte di credito può fare riferimento, per valutare le richieste, a dati precedenti relativi ai clienti «buoni» e «cattivi». La macchina non si cura dei particolari del problema: si limita a considerare coppie corrispondenti di ingressi (in questo caso informazioni personali) e uscite (concessione o rifiuto della carta di credito) e ad assorbire le informazioni contenute nella relazione tra le coppie. La macchina così istruita viene poi utilizzata per vagliare le richieste nuove. Con questo procedimento l'automazione viene portata a un livello più alto rispetto a quello solito: non solo si usa un calcolatore per svolgere un compito ripetitivo, ma si rende automatico il procedimento stesso che crea il sistema capace di svolgere quel compito.

In teoria è possibile applicare la metodologia dell'apprendimento artificiale a una vasta gamma di problemi. Se tuttavia gli esempi ingresso-uscita a disposizione non contengono le informazioni cruciali, non è detto che la macchina acquisisca le competenze volute. Per fortuna, spesso le informazioni necessarie possono essere aggiunte sotto forma di uno stratagemma comunemente chiamato «suggerimento intelligente». Queste informazioni supplementari possono essere semplici osservazioni o, all'opposto, conoscenze articolate.

Per esempio nella visione artificiale, il cui scopo è quello di riconoscere gli oggetti, si possono fornire molti suggerimenti basati sull'invarianza, cioè sul fatto che un oggetto rimane se stesso quando cambia posizione all'interno del campo visivo oppure quando cambia dimensioni. Nelle applicazioni al mercato finanziario ci sono molti suggerimenti di monotonia, i quali asseriscono che se un ingresso subisce uno spostamento uniforme in una direzione, anche l'uscita deve spostarsi uniformemente in una sola direzione. A ciascuna di queste applicazioni corrispondono suggerimenti specifici che possono facilitare il processo di apprendimento.

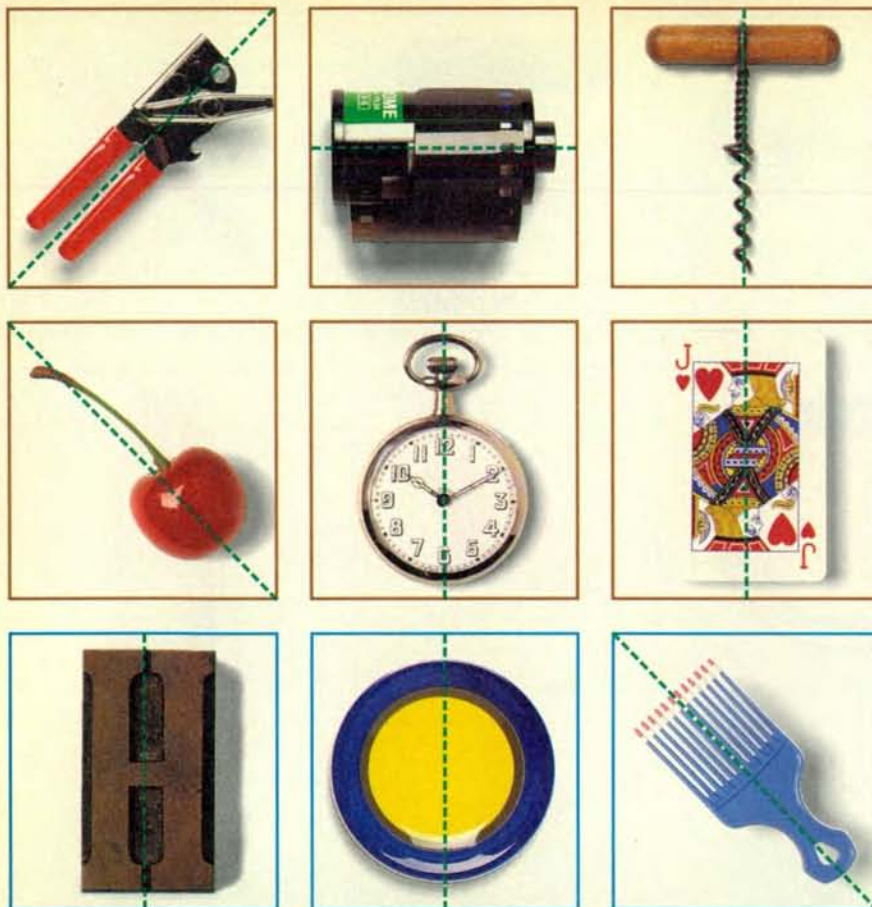
Ma se in merito a una determinata applicazione si sa abbastanza da poter fornire una serie di suggerimenti, perché perder tempo con l'apprendimento artificiale e non sfruttare queste conoscenze per progettare fin dall'inizio una macchina specializzata per quel compito particolare? In certi casi si può effettivamente procedere in questo modo, ma di solito si sa troppo poco del problema per individuare un metodo di soluzione basato su un insieme di regole ben definite.

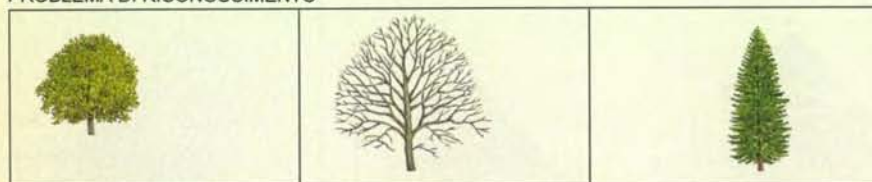
Le applicazioni spaziano tra due estremi: da una parte i problemi strutturati, che sono completamente definiti e non hanno bisogno di esempi, e dall'altra i problemi casuali, che sono del tutto indefiniti e la cui soluzione dipende interamente da un addestramento a base di esempi. L'apprendimento artificiale basato su suggerimenti intelligenti rappresenta il metodo per destreggiarsi nell'ampio territorio compreso tra questi due estremi.

### *Il paradigma dell'apprendimento artificiale*

Come possono apprendere le macchine? Dell'apprendimento artificiale sono stati formulati molti modelli diversi. In genere, il sistema impiegato ha una struttura che a grandi linee si attaglia al problema, ma contiene anche molti parametri liberi, che possono essere considerati alla stregua di manopole e quadranti per regolare il calcolatore. I valori assegnati a questi parametri di regolazione determinano il funzionamento manifestato in definitiva dalla macchina: a valori diversi dei parametri corrispondono risultati del tutto diversi.

Sotto il profilo matematico, il comportamento di un sistema può essere considerato come una funzione che associa ai valori d'ingresso (le specifiche del problema da risolvere) i corrispondenti valori di uscita (la decisione o

**Sapete risolvere questo rompicapo? Venti oggetti sono stati divisi in due classi, contrassegnate da una cornice marrone e da una azzurra. Qual è la caratteristica distintiva delle due classi? Spesso i calcolatori programmati per l'apprendimento tramite esempi si trovano di fronte a rompicapo di questo tipo. L'apprendimento può essere reso più rapido e agevole fornendo alla macchina opportuni suggerimenti. Per un suggerimento per la soluzione di questo rompicapo si veda alla pagina seguente.**

Un suggerimento visivo aiuta le macchine, e noi, a risolvere il rompicapo. Tracciando l'asse, i primi sei oggetti non hanno la simmetria speculare che caratterizza gli ultimi tre. Questo è l'attributo che distingue la classe marrone da quella azzurra.

PROBLEMA DI RICONOSCIMENTO

INVARIANZA RISPETTO ALLA TRASLAZIONE

INVARIANZA RISPETTO AL CAMBIAMENTO DI SCALA

**I suggerimenti relativi all'invarianza possono aiutare le macchine a riconoscere che gli oggetti non perdono la loro identità se sono osservati in modo diverso. Per esempio una macchina che tenti di riconoscere gli alberi non sa a priori che grandezza e posizione non contano (*in alto*). Un addestramento con esempi «virtuali» di oggetti diversi, come un viso o una sedia, potrebbe portare la macchina ad afferrare questi princìpi.**

l'azione da compiere). Lo scopo dell'apprendimento artificiale è far sì che la macchina emuli la funzione obiettivo, cioè produca la corrispondenza desiderata tra ingressi e uscite. Per guidare la macchina nella scelta dei valori dei parametri liberi, durante la fase di addestramento si possono usare esempi basati sulla funzione obiettivo. A ogni esempio la macchina raffina i propri posizionamenti interni in modo da far corrispondere ingressi e uscite in maniera appropriata. Quando la macchina raggiunge un posizionamento che attua nel modo migliore la funzione obiettivo, in pratica l'ha «appresa». L'apprendimento artificiale non è altro che la ricerca delle posizioni corrette delle manopole. Poiché la ricerca è guidata dagli esempi forniti in fase di addestramento, è abbastanza naturale chiamare questo paradigma «apprendimento basato su esempi».

Il modello più diffuso di apprendimento artificiale è la rete neurale (si veda l'articolo *L'apprendimento delle reti artificiali di neuroni* di Geoffrey E. Hinton in «Le Scienze» n. 291, novembre 1992). Le reti neurali, che si ispirano alla potenza dei sistemi neurobiologici reali, consistono in molti elementi di calcolo collegati tra loro in modo che l'uscita di ciascun elemento dipenda dagli ingressi provenienti da un certo numero di altri elementi. I parametri regolabili di una rete neurale si chiamano pesi sinaptici, per analogia con i loro corrispondenti biologici, cioè le sinapsi che collegano tra loro i neuroni del cervello. La flessibilità delle reti neurali e la facilità con cui possono essere addestrate le hanno rese, nell'ultimo decennio, il modello per eccellenza dell'apprendimento artificiale, tanto che attualmente esse vengono usate in un'ampia gamma di applicazioni. Sono state costruite reti specializzate elettroniche e anche ottiche (si veda l'articolo *Il calcolatore ottico neuronico* di Yaser S. Abu-Mostafa e Demetri Psaltis in «Le Scienze» n. 225, maggio 1987), ma quasi sempre le reti neurali vengono simulate mediante semplici programmi eseguiti su un personal computer o una stazione di lavoro.

Dato l'impegnativo addestramento necessario, si potrebbe temere di dover passare lunghe ore davanti al calcolatore per seguire il noioso processo di apprendimento della macchina. Per fortuna l'onere di trovare gli aggiustamenti ottimali è di solito affidato a un algoritmo di apprendimento, un metodo che riduce il procedimento a una serie di semplici passaggi ripetitivi che il calcolatore può effettuare per conto proprio. Uno dei sistemi di apprendimento oggi più comuni è l'algoritmo di propagazione all'indietro per l'addestramento delle reti neurali. Il primo a diffondere questa tecnica fu David E. Rumelhart quando era all'Università della California a San Diego.

**L'apprendimento artificiale comporta l'aggiustamento dei parametri interni di un sistema, portandolo a compiere le associazioni corrette tra i dati d'ingresso e le uscite desiderate. Per esempio un sistema per l'accettazione delle richieste di carte di credito sarebbe addestrato a collegare i dati personali dei richiedenti con quanto si sa dell'andamento delle loro finanze. In effetti nel procedimento di apprendimento la macchina «si aggiusta le manopole» fino a che riesce a riprodurre la relazione ingresso-uscita degli esempi di addestramento.**

La propagazione all'indietro porta a modificare i parametri della rete neurale sulla base di semplici calcoli. In fase di addestramento si considera un esempio (un ingresso e l'uscita corrispondente) e si apportano piccole modifiche ai parametri della rete per rendere minima la differenza tra la risposta fornita dalla rete e la risposta desiderata. Il procedimento viene ripetuto più volte, e ogni volta la rete viene spinta un po' più vicino allo stato desiderato. Dopo aver eseguito parecchie volte tutti gli esercizi, la rete riesce a riprodurre con sufficiente precisione la funzione voluta.

Vediamo come potrebbero andare le cose nel caso della richiesta di una carta di credito. In questo caso una coppia ingresso-uscita potrebbe essere costituita dai dati personali forniti dal richiedente (età, reddito, stato civile ed eventuali altri parametri utili) e dal consuntivo finale (cioè se la banca ha avuto perdite o profitti dopo aver concesso al cliente la carta di credito). Nel caso ideale, una rete neurale costruita per vagliare le richieste delle carte di credito dovrebbe prevedere il comportamento successivo di una persona solo in base ai dati da essa forniti. Per apprendere questa funzione, la rete considera migliaia di casi di richieste e consuntivi di persone reali e continua a modificare i propri parametri interni tentando di adattare la propria uscita a questi dati storici.

Alcuni dei parametri variabili potrebbero riguardare lo stipendio e potrebbero spingere la rete ad approvare le domande delle persone che dispongono di un reddito più elevato. Altri potrebbero corrispondere a determinate combinazioni di età e stato civile, favorendo combinazioni particolari di queste caratteristiche. Da ultimo viene raggiunto un aggiustamento definitivo, che porta la rete a fornire la risposta corretta sul massimo numero possibile di esempi di addestramento. A questo punto la rete può essere usata per giudicare una richiesta nuova estrapolando dalla propria «esperienza» una previsione sul comportamento del nuovo cliente nei confronti del credito concesso.

*L'apprendimento basato sui suggerimenti intelligenti*

Che siano attuati mediante una rete neurale o sotto qualche altra forma, tutti i metodi di apprendimento artificiale hanno in comune una caratteristica: l'apprendimento si basa su esempi. Per poter apprendere con esito positivo, la macchina dev'essere capace di generalizzare a partire dai pochi esempi di ingresso-uscita su cui ha effettuato l'apprendimento. Questi esempi offrono abbastanza informazioni perché la macchina risponda in modo adeguato ai nuovi ingressi? Non è detto. Che la macchina si comporti bene di fronte agli esempi di addestramento non sempre significa che si comporterà altrettanto bene di fronte a un caso mai incontrato prima.

Si ricordi che la macchina non sa nulla della funzione che sta cercando di apprendere se non ciò che vede nei dati di addestramento. Se i dati sono carenti (perché gli esempi sono troppo pochi oppure perché contengono troppe informazioni irrilevanti), la macchina non riesce a compiere generalizzazioni adeguate. Può anche darsi che gli esempi non contengano tutte le informazioni importanti. Supponiamo per esempio di voler addestrare un sistema di visione artificiale a riconoscere gli alberi. Può darsi che non si riesca a specificare in termini matematici precisi un metodo consistente per identificare un albero: in tal caso non si riesce a strutturare il problema e ad assegnare alla macchina regole rigide. Se ci si limita a mostrare alla macchina fotografie di alberi e di altri oggetti, le si forniscono informazioni, ma non le si dice tutto quello che si sa. Per esempio si sa che un albero resta tale anche se subisce una traslazione o un cambiamento di scala. Gli esseri umani lo intuiscono benissimo, ma la macchina no, a meno che non le si comunichino le informazioni in maniera esplicita. In assenza di suggerimenti la macchina potrebbe impiegare un tempo lunghissimo, o addirittura infinito, per conseguire questa «comprensione».

Anche il suggerimento più semplice può accelerare l'apprendimento. Come nel gioco delle venti domande, in cui le risposte a certi quesiti elementari possono restringere di molto la ricerca, pochi suggerimenti possono decidere tra l'apprendimento e il mancato apprendimento di una funzione. Per sfruttare questa circostanza, circa sei anni fa ho introdotto un formalismo che si chiama «apprendimento basato su suggerimenti» e che da allora è entrato a far parte di molti sistemi di apprendimento. Questa impostazione fornisce i risultati migliori nei sistemi automatici per stabilire i tassi di cambio dei mercati finanziari e nei procedimenti per la lettura di manoscritti.

Anche per risolvere il problema della concessione delle carte di credito si può trarre vantaggio dall'uso di suggerimenti intelligenti. Notoriamente è difficile definire con precisione che cosa renda una persona finanziariamente affidabile, ma un suggerimento è pressoché ovvio: se due individui hanno caratteristiche identiche, ma uno guadagna più dell'altro e la macchina approva la concessione della carta per quello che guadagna di meno, allora deve approvarla anche per quello che guadagna di più. È questo uno dei molti possibili suggerimenti di carattere monotòno. Durante la fase di apprendimento, la macchina dovrebbe dare ai propri parametri liberi valori tali da far corrispondere ingressi e uscite secondo la funzione obiettivo, ma anche in modo da soddisfare questi suggerimenti.

Un'applicazione dell'apprendimento tramite suggerimenti che i miei colleghi e io abbiamo attuato al Learning Systems Group del California Institute of Technology riguarda le quotazioni delle valute estere. Abbiamo condotto un esperimento di apprendimento artificiale per prevedere la quotazione del dollaro nei confronti di altre quattro importanti divise. Volevamo verificare se il sistema di cambio risultasse più proficuo qualora, durante il processo di apprendimento, venisse fornito un suggerimento basato sul buon senso. Il suggerimento da noi usato rifletteva una simmetria che a noi pareva ovvia: se un certo andamento nel tempo delle quotazioni comporta un certo movimento (al rialzo o al ribasso) del dollaro rispetto a un'altra moneta, allora questa moneta dovrebbe seguire lo stesso movimento se nella storia delle sue quotazioni si presentasse quell'andamento. I risultati dell'esperimento furono positivi e in tutti e quattro i mercati considerati il suggerimento basato su questa simmetria portò il sistema a un consistente aumento del profitto.

Per essere sicuri che il miglioramento del programma eseguito dalla nostra rete neurale fosse dovuto alle informazioni contenute nel suggerimento basato sulla simmetria, tentammo di ingannare la macchina con due alternative. La prima era un suggerimento privo di informazioni: fornimmo cioè alla macchina informazioni casuali. Con nostra soddisfazione, la macchina non ne trasse alcun vantaggio, poiché le sue prestazioni furono circa le stesse che in assenza di suggerimenti. Poi fornimmo alla macchina un suggerimento contenente informazioni deliberatamente errate. In questo caso le prestazioni peggiorarono subito, come ci aspettavamo. Il suggerimento intelligente si era rivelato effettivamente utile.

*Come rappresentare i suggerimenti*

Il problema più arduo in merito all'uso dei suggerimenti nell'apprendimento artificiale è quello di rendere automatico il procedimento. I suggerimenti si presentano sotto varie forme e possono essere vaghi o molto espliciti. Come fa un solo algoritmo a orchestrare l'apprendimento sulla base di tutte le svariate informazioni contenute in questi suggerimenti?

In primo luogo, le rappresentazioni dei suggerimenti debbono essere rese uniformi perché l'algoritmo di apprendimento sia in grado di trattarle tutte alla stessa maniera. Uno spunto su come si possa raggiungere questo scopo ci viene dato dalla rappresentazione della funzione obiettivo, che è assegnata sotto forma di esempi ingresso-uscita. Alla macchina viene suggerito: «Quando l'ingresso è così e così, devi produrre un'uscita così e così». L'insieme degli esempi ingresso-uscita distingue completamente una funzione obiettivo dall'altra. Secondo lo stesso principio, se riuscissimo a rappresentare ciascuno dei suggerimenti desiderati mediante un insieme di esempi, la natura dei suggerimenti da inserire non avrebbe più importanza.

Per rappresentare il suggerimento di monotonia nella situazione delle richieste di carte di credito, si consideri l'esempio di due persone cui corrispondono dati identici tranne l'entità dello stipendio. Quando la macchina esamina le due richieste, le sue risposte possono



EDIZIONI calderini

Con un catalogo di oltre 1000 titoli dalle scienze umane alle scienze naturali, dalle discipline economico-giuridiche alle tecnologie professionali, fino ai testi d'avanguardia nei settori dell'elettronica e dell'informatica

dal 1952

*vi segnaliamo*

**BIOLOGIA DEGLI UCCELLI**
**di H. H. Bergmann**
Pagg. 312, 171 ill. L. 42.000

**INSETTI IN VOLO**
**di J. Brackembury**
Pagg. 192, 96 ill. rilegato L. 50.000

**OCEANO - Clima e vita**
**di F. Mosetti - P. Mosetti Albrecht**
Pagg. 172, 63 ill. L. 25.000

**SAFARI**
**Viaggio negli ambienti naturali del mondo**
**di M. Elander - S. Widstrand**
Pagg. 144, 220 ill. rilegato L. 49.000

**IL PAESE DEGLI ETRUSCHI**
**Storia, archeologia, ambiente, gastronomia**
**di R. Bosi**
Pagg.VI+290, 243 ill. rilegato L. 80.000

**IL CLIMA CHE CAMBIA**
**di C. Carpenter**
Pagg. VIII+184, 110 ill. 75 figure, rilegato L.45.000

**IL MERAVIGLIOSO MONDO DEI CRISTALLI**
**di C. M. Gramaccioli**
Pagg. X+292, 102 ill. 75 figure, rilegato L. 50.000

**BARRIERE CORALLINE Greenpeace**
**di S. Wells - N. Hanna**
Pagg. 160, 228 ill. rilegato L. 65.000

**INQUINAMENTO E PROTEZIONE DEL MARE**
**di G. Cognetti - G. Cognetti**
Pagg. 318, 137 ill. L. 45.000

**DEPURAZIONE DELLE ACQUE**
**Tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto**
**di L. Masotti**
Pagg. XX+1144, 476 ill. rilegato L. 90.000

**MANUALE DI INFORMATICA**
**coord. da G. Cioffi - V. Falzone**
Pagg. XXX+1372, 328 ill. ( terza edizione ) L. 100.000

**MANUALE DI RETI DI TELECOMUNICAZIONI E TRASMISSIONE DATI**
**coord. da G. Setti**
Pagg. X+2096, 1350 ill. L. 139.000

RICHIEDETELE NELLE PRINCIPALI LIBRERIE O DIRETTAMENTE A EDIZIONI CALDERINI Via Emilia Levante, 31/2 - Bologna

INVIATEMI I VOLUMI QUI SOTTO ELENCATI A MEZZO PACCO POSTALE

☐ Allego a questa cedola l'importo del prezzo di copertina netto (spedire questa cedola in busta chiusa con l'importo in assegno bancario oppure assegno circolare).

☐ Pagherò contrassegno al postino l'importo dei libri + L.5.500 per spese.(Si evadono ordini di importo non inferiore a L. 15.000).

☐ Vi autorizzo ad addebitare l'importo dei libri ordinati sulla carta di credito CARTASI - VISA
N. carta ........ data di scadenza ........

Signor ........
Via ........ N. ........
CAP ........ Città ........
Firma ........

concordare con il suggerimento (approvazione o ricusazione di entrambe le richieste, o approvazione del solo richiedente a stipendio più alto) oppure non concordare (approvazione del solo richiedente a stipendio più basso). L'algoritmo di apprendimento può concorrere a mettere a punto i parametri della macchina in modo da soddisfare il suggerimento, proprio come se stesse incorporando un ulteriore esempio della funzione obiettivo. Questo tipo di apprendimento tramite suggerimenti può quindi sostituire altri meccanismi di apprendimento.

Non è necessario che gli esempi che rappresentano il suggerimento siano reali: i due richiedenti che dispongono di stipendi diversi potrebbero essere casi ipotetici o «virtuali». Si possono usare esempi virtuali perché non si chiede alla macchina di prendere la decisione giusta rispetto a una persona reale quanto di agire in modo coerente con il suggerimento. Questo principio può valere anche per il suggerimento di simmetria relativo ai tassi di cambio delle valute; si possono costruire esempi virtuali basati su andamenti delle quotazioni che non si siano mai presentati nella storia. Quanto al problema della visione artificiale, si possono rappresentare i suggerimenti d'invarianza impiegando figure di oggetti privi di qualunque relazione con la funzione obiettivo reale. Nell'addestramento impartito alla macchina tramite questo suggerimento non si richiede che il risultato fornito dal calcolatore sia giusto o sbagliato, ma solo che sia mantenuta la coerenza al variare della posizione o della scala della figura d'ingresso.

**I sistemi di cambio delle valute estere vengono perfezionati tramite i suggerimenti di simmetria. Per esempio, se il valore del dollaro sale rispetto a quello del marco tedesco quando si verifica un certo insieme di circostanze nella storia della sua valutazione, il marco dovrebbe aumentare la quotazione nello stesso modo quando la sua storia mostra lo stesso insieme di circostanze. Un modello a rete neurale per i tassi di cambio a cui era stato fornito questo suggerimento ha funzionato più efficacemente di quanto abbiano fatto macchine alle quali, per confronto, non era stato dato alcun suggerimento oppure un suggerimento privo di informazioni o erroneo.**

RIVALUTAZIONE ANNUA DEL CAPITALE (PER CENTO)
10
5
0
−5
−10
−15
−20
0 50 100 150 200 250
DURATA IN GIORNI DELL'ESPERIMENTO
CON SUGGERIMENTO ESATTO
CON SUGGERIMENTO PRIVO DI INFORMAZIONI
SENZA SUGGERIMENTI
CON SUGGERIMENTO ERRONEO

In molte applicazioni gli esempi virtuali sono importantissimi perché possono aggiungere corpose informazioni alla famiglia degli esempi usati per l'addestramento, che potrebbe essere anche alquanto scarna. Nelle previsioni dei cambi, per esempio, i dati reali sono costituiti dal ristretto insieme degli andamenti più recenti delle quotazioni. È quindi molto importante affiancare a questi scarni dati storici un certo numero di esempi virtuali. Resta il problema di trovare un algoritmo di apprendimento capace di conseguire un giusto equilibrio tra i suggerimenti e gli esempi ingresso-uscita reali.

*Verso l'equilibrio*

Un algoritmo di apprendimento cerca di mettere a punto i parametri della macchina in modo che essi concordino simultaneamente con tutto l'insieme di addestramento e con tutti gli esempi relativi a ciascun suggerimento. Ma solitamente una soluzione perfetta è impossibile, quindi si deve ricercare un compromesso. A questo scopo la macchina deve valutare a ogni passo il grado di accordo raggiunto. Durante la fase di apprendimento, determinati suggerimenti possono essere appresi meglio di altri, ma se il calcolatore riesce a individuare il suggerimento che è stato appreso nel modo peggiore, all'iterazione successiva può dedicargli più attenzione. Questo è il concetto su cui si basa *Adaptive Minimization*, un algoritmo da me ideato che programma la successione dei differenti suggerimenti per l'apprendimento in maniera tale da portarli all'equilibrio tra loro e con l'insieme di apprendimento.

L'algoritmo *Adaptive Minimization* è «adattativo», nel senso che valuta di continuo con quale approssimazione la macchina soddisfi sia i suggerimenti sia gli esempi di addestramento e modifichi con continuità i parametri aggiustabili. La «minimizzazione», od ottimizzazione, rispecchia il fatto che l'algoritmo cerca di render minima una misura quantitativa dell'errore tra le azioni che la macchina sta compiendo e il comportamento desiderato.

Quando cominciai a lavorare in questo settore avevo già sviluppato molte delle idee fondamentali, ma devo ammettere che il mio primo progresso importante lo compii per necessità più che per intuizione spontanea.

Ero stato invitato a presentare le linee generali dell'apprendimento basato su suggerimenti a un convegno scientifico e proprio il giorno prima dell'esposizione scoprii che il mio intervento avrebbe dovuto prolungarsi dieci minuti più di quanto avessi previsto. La prospettiva di trovarmi davanti al pubblico con un discorso troppo breve mi fece stare sveglio tutta la notte nel tentativo di ampliare la parte dell'esposizione dedicata all'algoritmo. Fu proprio quella notte che mi venne l'idea dell'algoritmo *Adaptive Minimization* e il giorno dopo la illustrai in conferenza, suscitando molto interesse. Ma non credo che gli ascoltatori si rendessero conto di quanto recenti fossero quei risultati!

*Ostacoli all'apprendimento*

La tecnologia dell'apprendimento artificiale deve affrontare ancora molti problemi. Le difficoltà più gravi derivano forse dalla tendenza che hanno le macchine a «sovrapprendere» nella fase di addestramento, tendenza che può compromettere il buon funzionamento del calcolatore. Si ha sovrapprendimento quando la macchina impara a memoria gli esempi di addestramento a scapito della generalizzazione. Ci si può imbattere nella stessa situazione paradossale visitando le piramidi d'Egitto. Alcune guide raccontano la storia dei monumenti in inglese con dovizia di particolari e rispondono con sicurezza alle domande più comuni sui faraoni. Se, incoraggiato da queste presentazioni, il turista passa ad altre, più approfondite domande, scopre con sorpresa che queste guide non sanno l'inglese! Hanno imparato a memoria le poche frasi necessarie per l'escursione, ma non hanno affatto «generalizzato». L'apprendimento artificiale può presentare lo stesso difetto.

Un'altra difficoltà frequente nei problemi più complessi di apprendimento artificiale è la necessità di un tempo di calcolo eccessivo. Nel cercare un posizionamento ottimo dei parametri liberi (il cosiddetto ottimo globale), talvolta l'algoritmo di apprendimento finisce in una configurazione meno buona (un ottimo locale), che è migliore di altre soluzioni ma non coincide con ciò che di meglio si potrebbe in teoria conseguire. In generale non vi è un metodo efficace per evitare gli ottimi locali. Alcuni problemi di apprendimento sono risultati NP-completi, termine tecnico che indica una classe di problemi di calcolo per i quali si ritiene che il conseguimento dell'ottimo globale richieda un tempo di calcolo eccessivo. In pratica tuttavia questo problema non ha conseguenze troppo gravi: se la macchina raggiunge un buon punto di ottimo locale, di solito la prestazione risulta soddisfacente.

Nonostante sia ancora afflitto da questi problemi, l'apprendimento artificiale si è dimostrato valido nella risoluzione di un'ampia gamma di problemi pratici. Si tratta di una disciplina classica, che affonda le radici in ricerche condotte molti decenni or sono, ma che negli ultimi anni è stata ripresa e arricchita. Affiancato dalle procedure per l'apprendimento basato su suggerimenti e da altri progressi tecnici imminenti, l'apprendimento artificiale avrà un'importanza sempre maggiore nella nostra vita quotidiana.

**Il riconoscimento di un viso sotto un angolo arbitrario viene facilitato da un suggerimento di simmetria. Una macchina «ingenua», che non sappia nulla del viso umano, avrebbe bisogno di molte viste per impratichirsi nel compito (*in alto*). Se le si presenta il suggerimento che i visi sono simmetrici (*in basso*), essa può procedere alla generalizzazione partendo da un numero minore di angoli visuali. Gli animali hanno una comprensione innata delle proprietà simmetriche delle figure: le scimmie imparano meglio a riconoscere un viso se lo memorizzano prima in vista di tre quarti anziché frontale.**

## BIBLIOGRAFIA

ABU-MOSTAFA Y. S., *Learning from Hints in Neural Networks* in «Journal of Complexity», 6, n. 2, giugno 1990.

*Artificial Intelligence*, Numero speciale di «Communications of the ACM», 37, n. 3, marzo 1994.

ABU-MOSTAFA Y. S., *Learning from Hints* in «Journal of Complexity», 10, n. 1, marzo 1994.

REFENES PAUL (a cura), *Neural Networks in the Capital Markets*, John Wiley, 1995.

# *Nascondersi sotto l'uniforme*

Tavole a colori di Eva Hülsmann

I protagonisti di questo sguardo d'artista sulla natura sono quattro insetti a prima vista molto simili tra loro. In realtà, come sa bene chi fa spettacolo, non è difficile farsi passare per un altro: basta imitarne l'abito e le movenze. Gli insetti riprodotti in questa pagina appartengono a quattro specie diverse: i primi tre sono vespidi mentre l'ultimo in basso fa addirittura parte di un ordine diverso, quello dei lepidotteri. Li accomunano le vivaci righe gialle e nere dell'addome che ci offrono l'occasione per descrivere diverse, interessanti forme di mimetismo.

Cominciamo dal primo in alto. *Polistes gallicus*, una tipica vespa, è il «modello base» che animali e uomini imparano subito a riconoscere e a temere per le dolorose punture che possono essere inferte dal pungiglione con cui termina l'addome delle femmine. Tra questa specie e le due sottostanti, *Sulcopolistes sulcifer* e *Vespula germanica*, si instaura un mimetismo mülleriano (dal nome dello zoologo tedesco Fritz Müller) che conferisce una difesa contro i predatori comuni, memori della spiacevole esperienza di essere stati punti da un rappresentante delle tre specie.

Anche il quarto insetto, *Sesia vespiformis*, cerca di giovarsi della cattiva fama degli altri tre per tenere lontani i predatori, ma, trattandosi di un innocuo lepidottero, privo di pungiglione, che imita specie armate, il suo mimetismo è di un altro tipo, batesiano (dal nome del naturalista inglese Henry W. Bates).

Ma non finisce qui. Il *Sulcopolistes sulcifer* sfrutta anche un'altra forma di mimetismo, il mimetismo aggressivo. Diffuso sia nel mondo vegetale (tra le piante carnivore) che animale (per esempio, tra i pesci, il blennio dai denti a sciabola che imita il labride pulitore; tra gli uccelli, il cuculo), questo sleale tipo di mimetismo può nuocere o alla forma imitata, parassitandola, o al suo buon nome. Del labride, per esempio, gli altri pesci si fidano non aspettandosi certo che strappi loro la pelle a brani, come invece fa il blennio. Il *Sulcopolistes* è una sorta di cuculo tra gli insetti: approfittando della sua somiglianza con *Polistes* ne invade i nidi deponendo uova che si svilupperanno a spese delle larve legittime.

Tornando alla *Sesia vespiformis* - di cui la pittrice ha isolato nella pagina a fronte un particolare del disegno delle ali - possiamo notare come la forte rassomiglianza con le vespe, sottolineata in vivo anche negli atteggiamenti, riveli, nel dettaglio delle curve rosse che ornano le ali, un residuo della policromia dell'ordine a cui l'animale effettivamente appartiene. *(ag)*

**Un maschio di *Drosophila* corteggia una femmina eseguendo una sequenza programmata di azioni. Nei primi stadi si orienta verso la femmina (*1*) e la percuote leggermente sull'addome con la zampa anteriore (*2*). Successivamente distende un'ala e la fa vibrare per produrre un «canto d'amore» (*3*). Quindi lambisce i genitali della femmina (*4*), tenta di montarla (*5*) e infine si accoppia con essa (*6*). Un'analisi approfondita della sequenza fa pensare che il contributo dei geni al comportamento sia spesso sorprendentemente sofisticato.**

# Come i geni «costruiscono» il comportamento

*Pazienti studi condotti sul corteggiamento e sull'accoppiamento delle drosofile hanno fornito importanti indicazioni su come i geni influenzano la manifestazione di comportamenti complessi*

di Ralph J. Greenspan

Nei primi 15 anni di questo secolo una scienza allora nuovissima, la genetica, incominciò per la prima volta a chiarire i meccanismi dell'ereditarietà. Lo studio di caratteri come il colore dei fiori o la forma delle ali nei moscerini della frutta confermò l'ipotesi, proposta nel 1865 da Gregor Mendel e rimasta a lungo oscura, secondo la quale i caratteri fisici vengono trasmessi dai genitori alla progenie mediante unità discrete di materiale ereditario, o geni (il nome attribuito nel 1911 a quelle misteriose unità). Come comunemente accade quando una nuova disciplina fa segnare i suoi primi successi, si iniziò ben presto ad applicare - spesso senza la dovuta riflessione - i risultati che via via si conseguivano all'interpretazione di fenomeni di tutt'altra natura, in particolare al comportamento umano; spesso si sostenne infatti che i comportamenti complessi siano orchestrati da singoli geni.

Eppure anche i ricercatori più scrupolosi non sono mai riusciti ad associare in modo convincente comportamenti umani specifici a geni singoli o a piccoli insiemi di geni. La ragione del loro insuccesso potrebbe risiedere nella metodologia: quando ci si occupa di comportamento umano, non vi è pressoché alcun modo per separare in maniera inequivocabile gli influssi dei geni da quelli della cultura e dell'educazione. D'altro canto, se anche fosse in qualche modo possibile mascherare gli effetti dell'ambiente e concentrarsi esclusivamente sugli aspetti genetici di un dato comportamento, non è detto che possa essere evidenziata una corrispondenza univoca. Indagini ben controllate condotte su organismi più semplici fanno pensare infatti che alla maggior parte dei comportamenti contribuisca un gran numero di geni, alcuni dei quali agiscono in modo molto sottile.

*Le prime teorie sull'uomo*

La domanda se il comportamento umano fosse ereditario venne posta per la prima volta più di un secolo fa. Francis Galton, pioniere nell'applicazione della statistica, fu tra i primi scienziati ad affrontare questo argomento quando, verso la fine del secolo scorso, analizzò caratteri fisici e comportamentali in vari genitori e nei loro figli adulti. Utilizzando un «coefficiente di correlazione» da lui inventato, Galton sostenne che i caratteri comportamentali sono ereditari; il confronto della distribuzione di questi caratteri in differenti generazioni gli permise di concludere che ciascuno era il prodotto di molteplici contributi da parte del materiale ereditario.

Agli inizi del Novecento, subito dopo la riscoperta del lavoro di Mendel, si impose una teoria piuttosto diversa, che venne condivisa da genetisti influenti come Charles B. Davenport, uno dei fondatori del Cold Spring Harbor Laboratory a Long Island. I più radicali fra questi ricercatori ascrissero caratteri mal definiti come il talento musicale, il temperamento o la «debolezza mentale» a singoli geni. Per esempio, nel 1921 Davenport sostenne: «Sembra probabile, in base ad ampi studi genealogici, che la debolezza mentale di grado medio e alto venga ereditata come un [carattere] recessivo semplice, o pressappoco». (Malgrado le loro opinioni divergenti sui meccanismi della trasmissione ereditaria, sia Galton sia Davenport trassero purtroppo dalle loro osservazioni conclusioni analoghe e pericolose. Galton, che coniò il termine «eugenetica», divenne un convinto assertore dell'idea che la razza umana andasse migliorata mediante incroci selettivi tra individui dotati di caratteri desiderabili. Anche Davenport appoggiò con entusiasmo questa pratica.)

Alcuni dei primi esperimenti ideati per stabilire l'effetto dei geni sul comportamento vennero realizzati negli anni venti ed ebbero come oggetto i cani; furono presi in esame, tra gli altri caratteri, la punta (con la quale viene indicata la posizione della preda) e la vocalizzazione durante la caccia.

Le razze di cani si differenziano per il comportamento non meno che per l'aspetto. Nei primi studi si fecero accoppiare cani che differivano per alcune caratteristiche comportamentali; i nati da questi incroci furono poi accoppiati fra di loro. Se il controllo di un determinato carattere comportamentale fosse stato affidato a un solo gene, o a pochi geni, ci si sarebbe aspettati di trovare una ripartizione degli animali della generazione finale in gruppi distinti: uno che assomigliasse decisamente alla madre, uno molto simile al padre e uno o più gruppi con caratteri comportamentali intermedi. Nel caso in cui parecchi geni fossero interessati nel controllo, si sarebbe dovuta invece trovare nei discendenti non una chiara ripartizione in gruppi, bensì un ampio spettro di comportamenti. I risultati ottenuti erano coerenti con quest'ultimo quadro e indicavano quindi che molti geni contribuivano alla comparsa di ciascun carattere. Analoghe conclusioni vennero fornite dallo studio della capacità di orientamento dei ratti in un labirinto.

Simili indagini hanno fornito una messe di informazioni, ma purtroppo avevano anche importanti limitazioni. Gli esperimenti basati sull'ibridazione non possono chiarire la base genetica di comportamenti che sono relativamente invarianti in tutti i membri di una specie. Per esaminare a fondo questo e altri problemi, si doveva disporre di mezzi in grado di identificare i geni specifici coinvolti nei vari comportamenti. Sfortunatamente queste tecniche divennero disponibili solo parecchi anni dopo.

Tuttavia già negli anni sessanta molti degli ostacoli tecnici alla «dissezione» genetica del comportamento degli animali avevano cominciato a cadere. Nel 1953 era stata decifrata la struttura del DNA. Studi sui microrganismi avevano rivelato che i geni specificano la costituzione chimica delle proteine. Quando un gene viene attivato, dirige la sintesi della proteina il cui codice è contenuto nel gene stesso; questa proteina, a sua volta, svolge una funzione indispensabile per l'organismo: per esempio, può contribuire alla costruzione e al funzionamento del sistema nervoso (il quale, in definitiva, modella il comportamento). Gli stessi studi avevano anche chiarito le varie fasi attraverso le quali i geni producono le proteine, e avevano posto le premesse per lo sviluppo, nel corso degli anni ottanta, di molti utili strumenti per isolare i singoli geni e determinare le funzioni delle proteine corrispondenti.

Seymour Benzer del California Institute of Technology è stato uno dei protagonisti della ricerca che ha permesso di stabilire che i geni sono segmenti lineari di DNA. A metà degli anni sessanta egli è anche stato uno dei primi ricercatori ad andare oltre il legame tra geni e caratteri fisici. Svolgendo studi particolareggiati sul moscerino della frutta (*Drosophila melanogaster*), Benzer cominciò a identificare geni che influiscono sui comportamenti; questo lavoro viene proseguito ancora oggi, particolarmente nel laboratorio di Jeffrey C. Hall - uno tra i primissimi ricercatori che hanno collaborato con Benzer in questo nuovo campo di indagine - alla Brandeis University, nel mio laboratorio alla New York University e altrove. Io cominciai a interessarmi all'argomento a metà degli anni settanta, quando fui tra i primi laureati a lavorare con Hall nel suo laboratorio presso la Brandeis University.

*Tutti i riflettori puntati sul moscerino della frutta*

Tra i comportamenti più ampiamente studiati c'è quello che i moscerini della frutta sembrano esibire al meglio: il corteggiamento. Esso consiste in una serie di azioni, ciascuna delle quali è accompagnata da uno scambio di segnali visivi, uditivi e chemosensoriali tra maschi e femmine. In questo complicato balletto il maschio è il soggetto più attivo e pertanto su di esso si è concentrata l'attenzione dei ricercatori.

Il rituale ha inizio con una fase cosiddetta di orientamento. Il maschio, che non ha bisogno di essere istruito in questo processo, sta di fronte alla femmina, a una distanza di circa 0,2 millimetri. Quindi le dà un colpetto sull'addome con uno degli arti anteriori e la segue se essa si allontana. Successivamente spiega un'ala e la fa vibrare per eseguire un «canto d'amore». In base al grado di interesse che la femmina mostra a questo punto, può ripartire da zero e ripetere questi atti. Se tutto procede bene, invece, srotola la proboscide (l'appendice tubulare che porta alla sommità l'apparato boccale) e lambisce con essa i genitali della femmina. Quindi passa alla monta e, se la femmina è recettiva, si accoppia con lei. Se il maschio non esegue per intero questa *routine* e la femmina non è diventata recettiva, non si ha accoppiamento. Nel mondo dei moscerini della frutta lo stupro è un evento eccezionale.

Come primo passo per individuare i geni che potrebbero avere un ruolo nel corteggiamento, Hall, lavorando all'inizio nel laboratorio di Benzer, tentò di identificare le parti del sistema nervoso centrale che controllano ciascun elemento del corteggiamento; a questo scopo produsse moscerini del tutto anomali, «mosaici» genetici fatti di un insieme di cellule maschili e femminili.

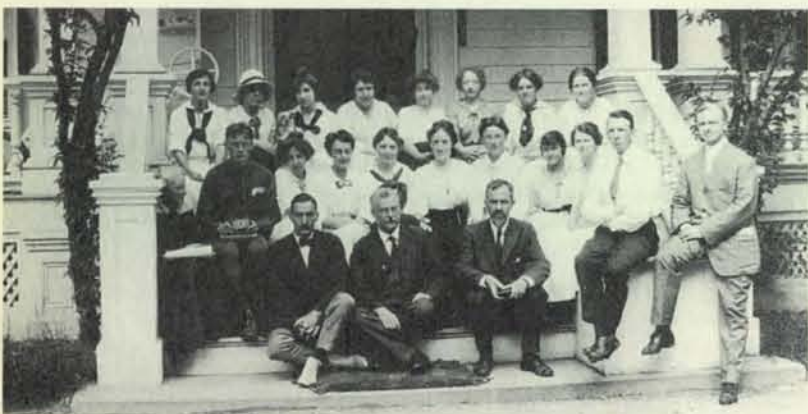
La sua tecnica si basava sulla conoscenza dello sviluppo sessuale di *Drosophila*. Negli embrioni di questo insetto, lo sviluppo sessuale è controllato dal corredo di cromosomi X presente in ciascuna cellula. Nell'insetto completamente formato, le cellule che hanno un

## Le prime teorie sul comportamento umano

Nei primi decenni di questo secolo due scienziati proposero teorie opposte sulle basi genetiche del comportamento, e in particolare sul problema se esso fosse determinato dall'azione di uno solo o di più geni. A partire dalla fine dell'Ottocento, Francis Galton, pioniere della statistica, sostenne che i caratteri umani, compresi i comportamenti, sono controllati da una moltitudine di unità ereditarie, le quali solo in seguito sarebbero state chiamate geni. Successivamente il genetista Charles B. Davenport asserì che il controllo era invece esercitato da singoli geni. Studi eseguiti sul moscerino della frutta e su altri animali indicano che l'opinione di Galton era probabilmente esatta.

**Francis Galton**

I nomi di Galton e Davenport suonano familiari perché entrambi furono fautori dell'eugenetica, ovvero, per usare le parole di Galton, della necessità di controllare la «fecondità dei non idonei» e di migliorare la razza umana «favorendo la produttività degli idonei». Fu Galton a introdurre il termine eugenetica negli anni ottanta del secolo scorso; in seguito Davenport, che fondò un centro di ricerca per l'eugenetica umana a Long Island, presso il Cold Spring Harbor Laboratory, portò ulteriormente avanti il programma. Nella fotografia qui sotto, Davenport appare seduto a destra sul gradino più basso.

**Charles B. Davenport**

**I partecipanti al corso di eugenetica del 1914**

singolo cromosoma X danno origine a strutture anatomiche e comportamenti maschili, mentre quelle che hanno due cromosomi X portano a un'anatomia e a un comportamento femminili. Queste differenze insorgono perché le cellule con un singolo cromosoma X (maschili) e quelle con due cromosomi X (femminili) attivano insiemi distinti, anche se in parte sovrapposti, di geni «determinanti del sesso». Hall sapeva che se un moscerino era dotato in prevalenza di cellule femminili, ma possedeva cellule maschili in un particolare sito del cervello, ogni attività di corteggiamento tipicamente maschile da esso esibita poteva essere attribuita a un tipo maschile di espressione, o attivazione, genica in quel sito.

Una volta prodotti i mosaici, Hall osservò i loro tentativi di corteggiamento. Quindi congelò i minuscoli insetti (lunghi appena 1,5 millimetri) e li sezionò scrupolosamente in 20 fettine, distinguendo (con l'aiuto di un'ingegnosa tecnica di colorazione) la distribuzione delle cellule maschili e femminili. Negli anni settanta questi esperimenti erano particolarmente snervanti perché il metodo che serviva a creare i mosaici aveva un inconveniente: non c'erano due individui che, alla fine, avessero esattamente la stessa distribuzione di cellule maschili e femminili. Ogni moscerino doveva sopravvivere a tutta una serie di test comportamentali, e tutte le 20 sezioni dovevano essere analizzabili. L'unicità di ciascun individuo faceva sì che lo sperimentatore non avesse una seconda possibilità.

Dopo aver esaminato molti di questi mosaici, Hall concluse che era necessaria la presenza di cellule maschili sull'uno o sull'altro lato di una regione relativamente piccola, posta vicino alla sommità e verso la parte posteriore del cervello, perché si verificassero le fasi iniziali del corteggiamento (orientamento del maschio verso la femmina, colpetti sull'addome, inseguimento ed estensione di una delle ali del maschio). In questa regione confluiscono i segnali provenienti dai vari sistemi sensoriali del moscerino; la presenza di cellule maschili in questa sede dà in qualche modo origine a un meccanismo che induce il corteggiamento ed è presente nei maschi ma non nelle femmine. Per le fasi successive del corteggiamento, specialmente per quelle che richiedono una precisa coordinazione motoria, è necessaria la presenza di tessuto maschile anche in altre parti del sistema nervoso. Per esempio, per eseguire in modo corretto il canto di corteggiamento, i moscerini devono possedere cellule maschili sia nella regione del meccanismo scatenante sia in alcune parti del ganglio toracico che, nei moscerini della frutta, corrisponde al midollo spinale.

Più recentemente i miei collaboratori e io abbiamo anche identificato la regione del cervello che in *Drosophila* è interessata nella determinazione della preferenza sessuale. Ci siamo riusciti quasi involontariamente, dopo che Jean-François Ferveur (che oggi lavora all'Università di Parigi a Orsay) aveva prodotto interi ceppi di moscerini della frutta prevalentemente maschili, ma dotati di cellule femminili in particolari aree del cervello. Prima di studiare il corteggiamento in questi soggetti, abbiamo cercato di stabilire se maschi adulti scambiavano per femmine i nostri mosaici e abbiamo visto che non era così; con nostra sorpresa, però, alcuni ceppi di mosaici hanno mostrato uno strano comportamento: corteggiavano con lo stesso ardore sia i maschi sia le femmine.

L'esame del cervello di tali insetti, effettuato in collaborazione con Klemens F. Störtkuhl e Reinhard F. Stocker della Università di Friburgo, ha rivelato che la discriminazione sessuale era alterata quando o il lobo antennale o il corpo fungiforme del cervello avevano cellule femminili. Entrambe queste regioni, la seconda delle quali è localizzata vicino al sito che induce il corteggiamento, partecipano all'elaborazione dei segnali olfattivi. Se almeno uno di questi centri per l'analisi degli odori possiede cellule femminili, il moscerino perde la capacità di distinguere i maschi dalle femmine e mostra un uguale interesse sessuale per qualunque individuo.



### *Influenze genetiche sul corteggiamento*

La scoperta che tante diverse regioni del sistema nervoso centrale sono interessate nel corteggiamento fa pensare che a questo processo partecipi anche una varietà di geni; e, in effetti, ne sono stati scoperti oltre dieci, soprattutto da parte di Hall e collaboratori. Per esempio, il gene *fruitless* influisce sulla preferenza sessuale. Una mutazione in questo gene ha sui moscerini di sesso maschile più o meno lo stesso effetto della presenza di cellule femminili nel lobo antennale o nel corpo fungiforme: fa sì che i maschi corteggino altri maschi con altrettanto slancio di quanto facciano con le femmine. Il gene è necessario anche per le fasi successive del corteggiamento: i maschi portatori di un gene mutante non tentano mai di accoppiarsi con le femmine.

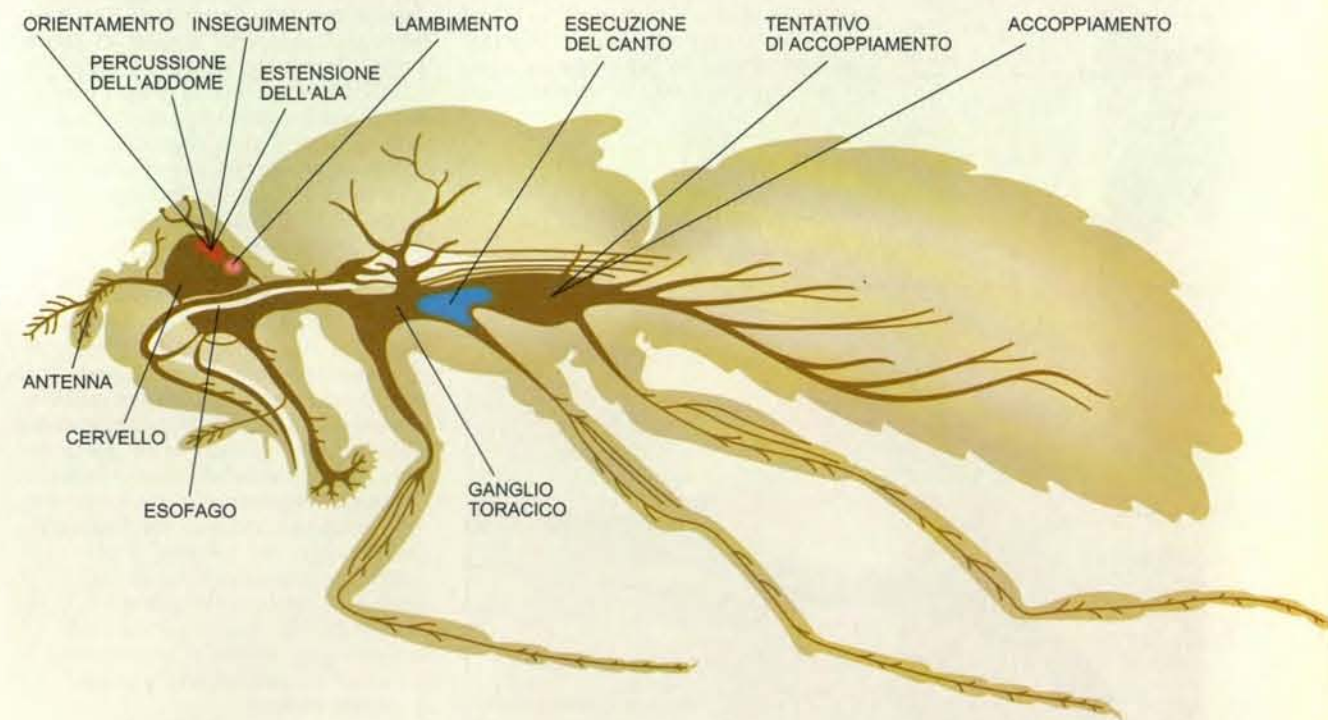
Il quadro che comincia a delinearsi è dunque più conforme alla visione di Galton che a quella di Davenport. Stranamente, nessuno ha ancora identificato un gene coinvolto nel corteggiamento che sia deputato esclusivamente a esso. Un numero crescente di dati fa pensare a una spiegazione che né Galton né Davenport avevano previsto. Può darsi che la maggior parte dei geni coinvolti nel corteggiamento (e in altri comportamenti) svolga più di una funzione nell'organismo; geni identici potrebbero avere anche funzioni in qualche misura diverse nei maschi e nelle femmine.

Si consideri, per esempio, uno dei tre geni noti che controllano il canto di corteggiamento del maschio; denominato *period*, il gene è stato studiato in grande dettaglio da Hall e Charalambos P. Kyriacou dell'Università di Leicester.

Hall e Kyriacou decisero di esaminare questo gene quando, nel 1980, scoprirono che il canto del maschio ha un suo ritmo caratteristico. Essi sapevano già, dalle ricerche condotte da un allievo di Benzer, Ronald J. Konopka, che il gene *period* influisce sui ritmi circadiani del moscerino, cioè su quegli «orologi» interni che sono caratteristici di tutti gli esseri viventi e che servono, per esempio, per regolare la veglia e il sonno. Questa osservazione li indusse a chiedersi se il gene *period* potesse anche influire sul ritmo del canto di corteggiamento.

Il canto prodotto facendo oscillare l'ala non è molto musicale per il nostro orecchio, ma ha comunque un ritmo riconoscibile. Quando l'insetto alza e abbassa l'ala, il movimento in su e in giù produce un suono caratteristico, o impulso, che può essere captato da un registratore. Per circa 27 secondi, il maschio aumenta gradatamente l'intervallo tra due impulsi successivi; quindi, dopo altri 27 o 28 secondi, lo fa a poco a poco diminuire, sicché, se si riportano in grafico gli intervalli in funzione del tempo, si ottiene una curva sinusoidale uniforme.

Hall e Kyriacou hanno trovato che i maschi con un gene *period* normale producono un canto del tipo descritto, che rende le femmine recettive ai loro approcci; per contro, i maschi nei quali il gene è inattivo generano un canto privo del solito ritmo uniforme e chiaramente meno efficace nell'indurre le femmine all'accoppiamento. Quando si facevano ascoltare a femmine sole simulazioni di canti normali e aritmici, generate al calcolatore, e poi le si metteva in compagnia di un maschio, le femmine esposte al canto aberrante si mostravano meno recettive agli approcci del maschio. Così pure, mutazioni meno drastiche a carico di questo gene consentono alla ritmicità di conservarsi, ma estendono o contraggono la curva sinusoidale, riducendo così l'efficacia che il canto ha sulla femmina.

Il modo non particolarmente vistoso con cui *period* fa sentire i propri effetti sul corteggiamento, in generale, e sul canto, in particolare, conferma l'idea che il corteggiamento (come altri comportamenti complessi) sia regolato da molteplici geni che agiscono in sintonia. Il fatto poi che *period* partecipi alla regolazione di altri orologi biologici e

**I siti del sistema nervoso centrale (*in marrone*) che controllano le varie fasi del corteggiamento nei maschi del moscerino della frutta sono stati individuati studiando moscerini consistenti in un mosaico di cellule geneticamente maschili e femminili. Per effettuare le fasi iniziali del corteggiamento (orientamento, percussione dell'addome della femmina, estensione dell'ala) e seguire le femmine nelle loro peregrinazioni, i moscerini devono possedere cellule maschili in una piccola zona che funge da «innesco» (*in rosso*) e che è situata nella parte posteriore del cervello. L'azione di lambire la femmina è indotta da cellule maschili vicine alle precedenti (*in rosa*), il canto da cellule maschili presenti in una parte del ganglio toracico (*in blu*) e infine l'accoppiamento da cellule maschili situate in numerose sezioni differenti del ganglio toracico.**

si esprima in molte parti del sistema nervoso centrale dà ulteriore sostegno all'ipotesi che un dato gene possa influire su più di un comportamento.

Con un'affascinante serie di scoperte, Hall, Kyriacou e Michael Rosbash, anch'egli della Brandeis University, hanno di recente individuato l'esatta regione del gene che controlla il ritmo del canto: si tratta di una piccola zona situata proprio nel suo centro, mentre le parti rimanenti regolano altri ritmi. Questa «suddivisione del lavoro» è stata dedotta fra l'altro dal fatto che una specie differente di moscerino della frutta, *D. simulans*, ha lo stesso ciclo di 24 ore di attività e riposo mostrato da *D. melanogaster*, ma il suo canto differisce per gli intervalli tra gli impulsi. Il gene *period* è uguale in entrambe le specie, tranne che per piccole differenze nella regione centrale. Per di più, moscerini sottoposti a manipolazione genetica, con un gene *period* ibrido prodotto sostituendo la regione centrale del gene di *D. melanogaster* con il segmento corrispondente del gene di *D. simulans*, cantano esattamente come fa *D. simulans*.

Anche se la preferenza sessuale e il corteggiamento sono certamente comportamenti programmati nel moscerino della frutta, maschi e femmine hanno la capacità di modulare la propria attività in risposta alle reazioni reciproche. In altre parole, possono apprendere. Proprio come la capacità di effettuare il corteggiamento è sotto controllo genetico, così lo è anche la capacità di apprendere dall'esperienza. Studi su questo fenomeno hanno fornito un ulteriore sostegno all'ipotesi che il comportamento sia regolato da una miriade di geni interagenti, ciascuno dei quali ha anche altre responsabilità all'interno dell'organismo.

### *Imparare dall'esperienza*

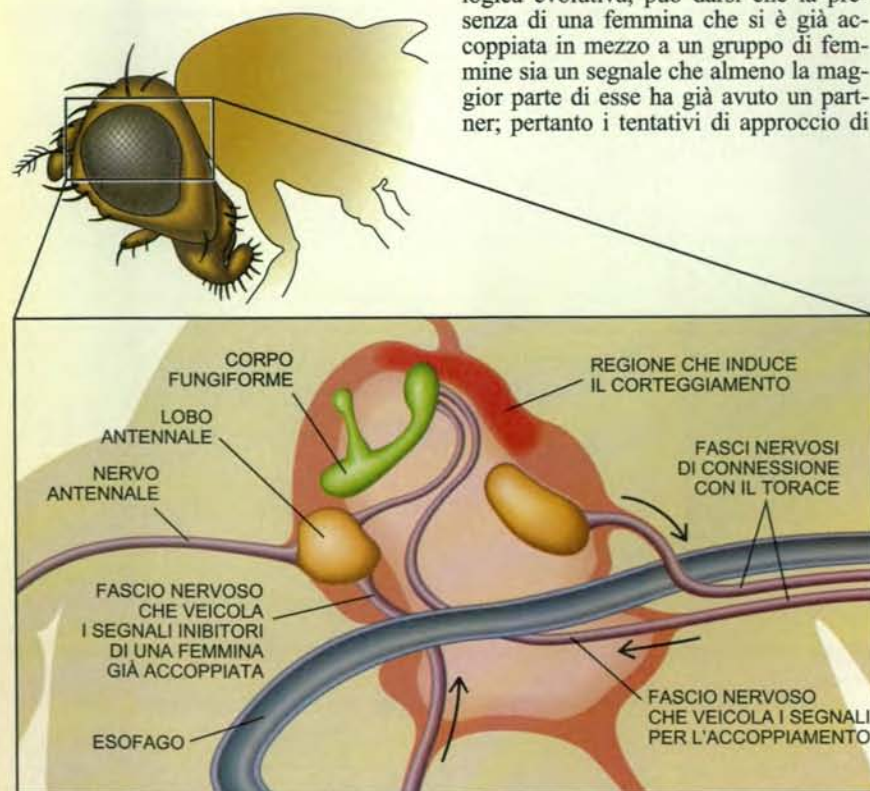
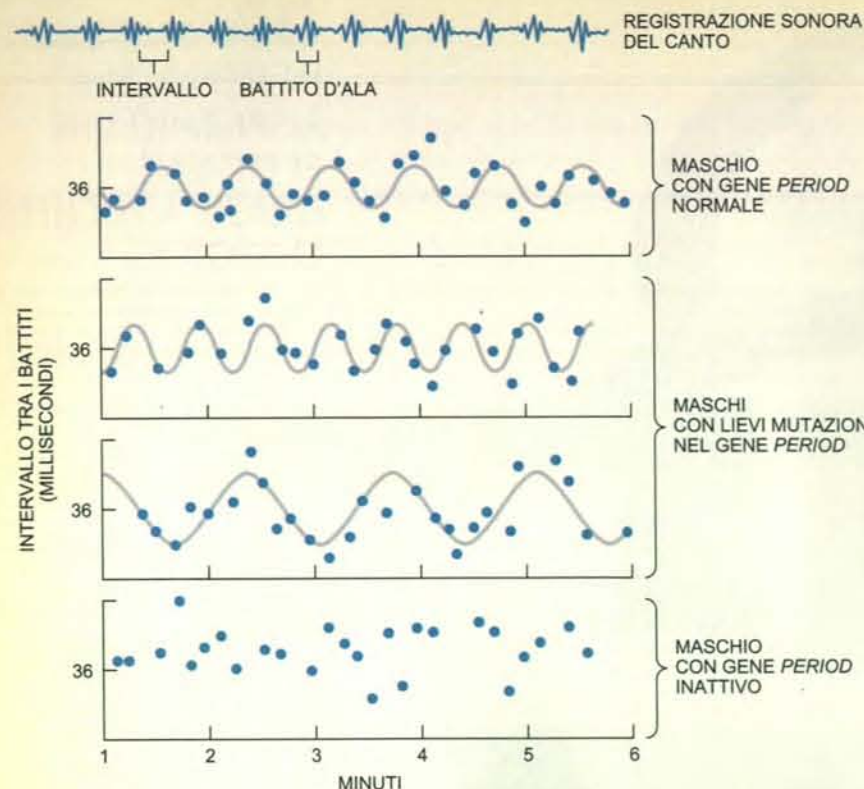
Una cosa che un maschio può apprendere durante il corteggiamento è non perdere tempo con una femmina che si è già accoppiata e che, di conseguenza, non è più recettiva. Come hanno scoperto Hall e Richard W. Siegel dell'Università della California a Los Angeles, i moscerini di sesso maschile corteggiano instancabilmente le femmine «vergini», ma perdono interesse verso quelle che si sono già accoppiate nell'arco di circa 30 minuti o un'ora, non appena iniziano ad avvertire il feromone inibitore emesso dalle future madri. Una volta che i maschi hanno rinunciato all'inseguimento, per alcune ore perdono interesse per tutte le femmine, vergini o no. Se in questo comportamento si può riconoscere una logica evolutiva, può darsi che la presenza di una femmina che si è già accoppiata in mezzo a un gruppo di femmine sia un segnale che almeno la maggior parte di esse ha già avuto un partner; pertanto i tentativi di approccio di un maschio potrebbero essere più utilmente orientati altrove.

Le mie indagini sulle basi genetiche di questa risposta hanno avuto inizio alcuni anni fa e sono state condotte con Leslie C. Griffith, oggi alla Brandeis University. Dal lavoro di altri ricercatori avevamo appreso che un enzima, la proteinchinasi II calcio/calmodulina-dipendente (CaMKII), può prender parte alla registrazione degli effetti dell'esperienza nei neuroni inducendo cambiamenti molecolari che sono probabilmente essenziali per l'apprendimento. Abbiamo allora deciso di vedere se i maschi avevano bisogno di questa proteina (e quindi del gene corrispondente) per poter reagire in modo appropriato alle femmine già accoppiate.

Come primo passo, Griffith ha ottenuto per manipolazione genetica un ceppo di moscerini nei quali la proteina CaMKII poteva essere inattivata semplicemente innalzando la temperatura corporea. In effetti, è risultato che, quando l'attività dell'enzima veniva ridotta anche solo blandamente, i maschi appartenenti a quel ceppo si comportavano in modo stravagante. Come i maschi normali, mostravano un notevole ardore nel corteggiare le femmine vergini e perdevano interesse per quelle già accoppiate dopo la solita ora circa; tuttavia, a quanto pare, dimenticavano quasi immediatamente questa rinuncia. Se venivano messi assieme ad altre femmine poco dopo essere stati respinti da una femmina già accoppiata, davano di nuovo avvio al corteggiamento. Quando la CaMKII veniva inibita maggiormente, la capacità di apprendimento dei maschi si annullava del tutto: corteggiavano per ore, instancabilmente, anche le femmine già accoppiate. (A quanto pare, anche nel mondo dei moscerini, alcuni maschi non imparano mai!)

Una volta stabilito che il gene *CaMKII*, attraverso il suo prodotto enzimatico, partecipa all'apprendimento durante il corteggiamento, cominciammo naturalmente a chiederci quale fosse la funzione dell'enzima nel registrare l'esperienza. Tutte le proteinchinasi agiscono fosforilando altre molecole (cioè addizionando loro gruppi fosfato); i bersagli vengono in questo modo attivati o inattivati. Ma qual era il bersaglio della chinasi nei neuroni, e che cosa succedeva dopo che esso era stato fosforilato? Questi interrogativi hanno finito per portarci a scoprire che anche un secondo gene espresso nei neuroni, il gene *eag*, è fondamentale in questo tipo di apprendimento.

### *Un altro gene per l'apprendimento*

Il prodotto proteico di *eag* è una componente di alcuni canali che attraversano tutto lo spessore della membrana cellulare e regolano il flusso degli ioni potassio verso l'esterno dei neuroni. L'apertura di questi canali contribui-

**La sede dell'attrazione per le femmine è localizzata in due siti del cervello del maschio di *Drosophila* (*qui illustrato schematicamente*): il primo è il lobo antennale, mentre l'altro è il corpo fungiforme, situato vicino alla regione cerebrale responsabile dell'avvio del corteggiamento. L'importanza di queste regioni è stata scoperta quando maschi sottoposti a manipolazione genetica che possedevano cellule femminili in uno dei due siti hanno cominciato a corteggiare moscerini di entrambi i sessi.**

**Per produrre il canto di corteggiamento un moscerino della frutta di sesso maschile estende un'ala (*sequenza a destra*) e poi la fa vibrare. Nel canto normale l'intervallo tra ogni battito d'ala (*indicato nella registrazione sonora in alto*) aumenta a poco a poco in circa 27 secondi e quindi diminuisce in maniera altrettanto graduale; riportando in grafico questi intervalli si ottiene una curva sinusoidale (*curva in alto*). È stato dimostrato che questa ritmicità è controllata da un gene chiamato *period*. I moscerini che possiedono un gene *period* integro hanno un canto normale, mentre quelli con un gene leggermente difettoso producono ritmi anomali (*curve al centro*) e quelli con un gene inattivo perdono completamente la capacità di cantare (*in basso*).**

sce a controllare l'eccitabilità della cellula e la liberazione di neurotrasmettitori, i quali veicolano i messaggi da cellula a cellula. (Il nome del gene, abbreviazione di *ether-a-go-go*, deriva dal fatto, scoperto negli anni sessanta, che quando i moscerini portatori di geni *eag* mutanti vengono anestetizzati, le loro zampe cominciano a vibrare.)

Sulla base di numerosi indizi forniti dalle nostre ricerche e da quelle di Jing Wang e Chun-Fang Wu dell'Università dello Iowa e di altri studiosi, Griffith e io abbiamo cominciato a pensare che l'enzima CaMKII potesse partecipare all'apprendimento modificando la proteina EAG nei canali del potassio. Per esempio, Eric R. Kandel e collaboratori della Columbia University avevano dimostrato che nel mollusco marino *Aplysia* un tipo di canale del potassio viene modificato da una chinasi durante una semplice forma di apprendimento. Inoltre abbiamo scoperto che mutazioni a carico della proteina EAG provocavano nei maschi essenzialmente la stessa «testardaggine» di quanto facesse l'inibizione dell'attività della CaMKII. Queste scoperte sottintendevano che le due proteine potessero essere attive nella stessa cascata di interazioni molecolari e che la CaMKII potesse agire sulla proteina EAG.

Con nostra gioia, Griffith confermò che l'enzima era effettivamente in grado di modificare la proteina EAG, perlomeno in provetta. Basandoci su questi dati e su misurazioni elettriche dell'attività sinaptica in animali mutanti, abbiamo ipotizzato che i maschi apprendano a rinunciare alle femmine che si sono già accoppiate attraverso l'attivazione della seguente serie di reazioni molecolari.

Innanzitutto, l'esposizione dei maschi a feromoni antiafrodisiaci mentre stanno corteggiando femmine già accoppiate stimola i sistemi sensoriali che inviano segnali alla regione cerebrale sede del meccanismo che induce il corteggiamento. Il risultato di questa stimolazione è un accumulo locale di calcio nelle cellule che di norma promuovono l'eccitazione sessuale durante il corteggiamento. Questo accumulo attiva a sua volta la CaMKII, la quale fosforila la proteina EAG nei canali del potassio; in seguito a questa modificazione i canali si aprono e permettono agli ioni potassio di uscire dai neuroni, riducendone l'attività e la capacità di liberare neurotrasmettitori. Quando i neuroni diventano silenti, i maschi perdono interesse per l'accoppiamento. Per contro, i moscerini che sono portatori di difetti nei geni responsabili della sintesi di una delle due proteine conservano un interesse mal riposto per le femmine già accoppiate, presumibilmente perché i canali del potassio rimangono chiusi nei neuroni interessati, il che consente a questi neuroni di diventare iperattivi.

È stato rilevato che i geni *CaMKII* ed *eag* fanno parte di un gruppo di geni che, nel moscerino della frutta, influiscono sull'apprendimento e sulla memoria. Alcuni di questi ulteriori geni sono coinvolti nel corteggiamento: tale risultato si accorda bene con l'idea che i comportamenti derivino dalle interazioni di vaste reti di geni, la maggior parte dei quali interviene regolando numerosi e svariati aspetti della biologia di un organismo.



### *Una lezione per l'uomo?*

La lezione che si può trarre dagli studi genetici sul comportamento di *Drosophila* ha qualche importanza per la nostra specie? Entro certi limiti, penso che sia così. Ci sono ovvi motivi per ritenere che le influenze genetiche sul comportamento umano siano perlomeno altrettanto complesse di quelle che si esercitano nel moscerino della frutta; perciò è presumibilmente vera l'idea che diversi geni aventi molteplici funzioni diano ciascuno un piccolo contributo. Inoltre molti dei prodotti genici attivi nel cervello del moscerino risulteranno probabilmente importanti anche nel cervello umano: per numerosi geni originariamente identificati nel moscerino della frutta, come *eag*, sono già state scoperte le controparti umane. Questi risultati dovrebbero chiarire il quadro delle interazioni molecolari che consentono al sistema nervoso centrale di produrre il comportamento.

Le nuove tecnologie fanno sperare di potere in futuro rivelare i contributi dati da ogni singolo gene ai caratteri umani individuali. Esse vengono già applicate nello studio di una varietà di tratti complessi, tra cui le capacità musicali, anche se oggi si procede in maniera più prudente che ai tempi di Davenport. Questo lavoro, insieme con le estrapolazioni della ricerca sugli animali, permetterà probabilmente di individuare alcuni dei geni che danno il loro contributo a comportamenti umani specifici. Ma qualunque ricerca che pretenda di spiegare l'attività umana in termini puramente genetici deve essere presa in considerazione con grande prudenza. La riluttanza ben fondata da parte della nostra società ad allevare un individuo in un ambiente perfettamente controllato rende in pratica impossibile dimostrare la validità di simili affermazioni.

#### BIBLIOGRAFIA

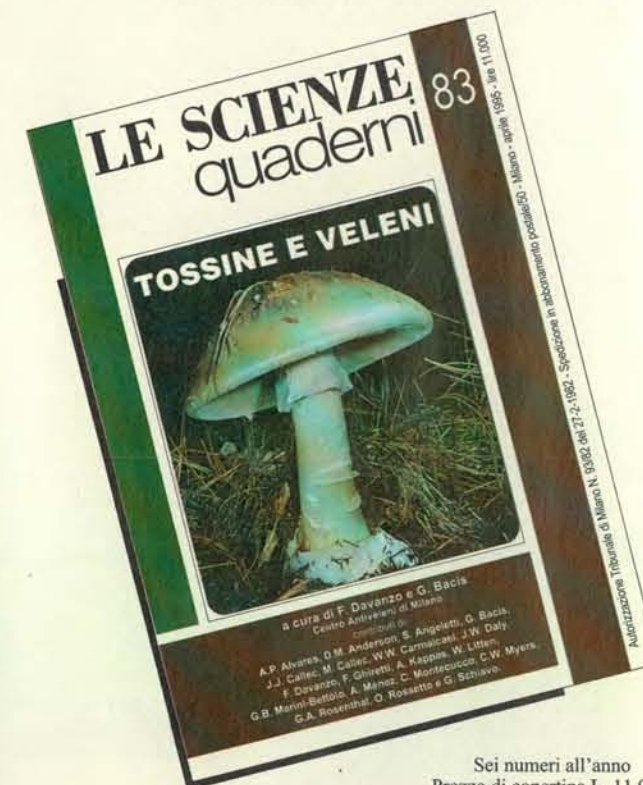

GRIFFITH L. C. e altri, *Inhibition of Calcium/Calmodulin-Dependent Protein Kinase in* Drosophila *Disrupts Behavioral Plasticity* in «Neuron», 10, n. 3, marzo 1993.

HALL J. C., *The Mating of a Fly* in «Science», 264, 25 marzo 1994.

GRIFFITH L. C. e altri, *Calcium/Calmodulin-Dependent Protein Kinase II and Potassium Channel Subunit EAG Similarly Affect Plasticity in* Drosophila in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 91, n. 21, 11 ottobre 1994.

FERVEUR J.-F. e altri, *Genetic Feminization of Brain Structures and Changed Sexual Orientation in Male* Drosophila melanogaster in «Science», 267, 10 febbraio 1995.



Effetti nefasti e impieghi farmacologici sono le due facce di TOSSINE E VELENI.
I meccanismi d'azione di queste sostanze biologicamente attive a dosaggi infinitesimali sono descritti nel quaderno di «Le Scienze» curato da specialisti del Centro antiveleni di Milano.


Sei numeri all'anno
Prezzo di copertina L. 11.000.

In questo numero:
*Tossine, veleni, recettori e farmaci* di F. Davanzo e G. Bacis
*I veleni del sistema nervoso* di J.J. Callec e M. Callec
*Le tossine dei cianobatteri* di W.W. Carmichael
*Le maree rosse* di D.M. Anderson
*Le neurotossine degli animali marini* di F. Ghiretti
*Vittorio Espamer - Nuove sostanze dal mare* di S. Angeletti
*Le basi molecolari di tetano e botulismo* di G. Schiavo, O. Rossetto, C. Montecucco
*Rane velenose* di C.W. Myers e J.W. Daly
*Le tossine degli animali velenosi* di A. Ménez
*Le difese chimiche nelle piante superiori* di G.A. Rosenthal
*I curari* di G.B. Marini-Bettòlo
*Funghi velenosi* di W. Litten
*Centri antiveleni: ruolo e funzioni* di Maria Luisa Farina

# Il calcolatore come storico dell'arte

*Alcuni enigmi posti da antiche opere d'arte vengono a cadere di fronte all'analisi storica e all'indagine elettronica*

di Lillian Schwartz

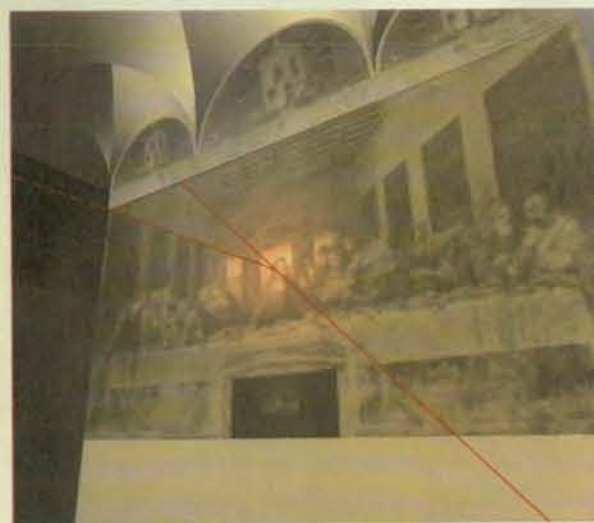
Otto anni or sono stavo provando con il mio collega Gerard Holzmann le potenzialità di un programma per calcolatore in grado di riprodurre specularmente immagini, modificarne la scala e giustapporle. Avevo sempre avuto un forte interesse a confrontare i volti e talvolta a combinare ritratti in modo da creare differenti effetti visivi. In precedenza avevo effettuato scansioni di molte immagini, tra cui il ritratto leonardesco di Monna Lisa - *La Gioconda* - e l'autoritratto dello stesso Leonardo da Vinci. Si tratta in entrambi i casi di viste di tre quarti, che guardano però in direzioni opposte. Ribaltammo specularmente l'autoritratto e dimensionammo le immagini in modo che la distanza fra il centro delle pupille risultasse uguale. A quel punto bisecammo i ritratti e allineammo le punte dei nasi prima di giustapporre le due metà.

Quando l'immagine composita cominciò a formarsi sullo schermo, le attaccature dei capelli parvero corrispondere. Apparvero le fronti con le nette arcate sopraccigliari, fortemente somiglianti; poi gli occhi, con le pupille allineate alla stessa altezza; infine, gli zigomi, i nasi e le bocche combaciarono esattamente. Trasalii. «Qualcosa non va nel mio programma?» domandò Gerard.

Altri dettagli confermavano la somiglianza fra i ritratti. Le distanze fra gli angoli interni degli occhi, una delle caratteristiche più distintive di un volto, corrispondevano con uno scarto del 2 per cento. L'arcata sopraccigliare sporgente - che si trova in più del 90 per cento dei maschi - è presente sia nell'autoritratto sia in Monna Lisa. (Nessuno di questi due tratti corrisponde a quelli di un disegno precedente, che si è ritenuto essere un bozzetto preparatorio per *La Gioconda*. Il bozzetto, però ha una forte rassomiglianza con un altro schizzo, che i raggi X hanno rivelato al di sotto del dipinto.)

Verso la fine del XV secolo Leonardo lasciò Milano con il suo studio iniziale per *La Gioconda*, e continuò a lavorarvi per anni. Nel 1519, alla sua morte, aveva il dipinto con sé. La mia ipotesi è che, per completare il lavoro in assenza del suo modello, Leonardo abbia usato come modello se stesso e abbia così commisto al dipinto i propri lineamenti. Egli utilizzò la sua particolare tecnica di ombreggiatura, lo sfumato, per miscelare e sostituire parti del volto di Monna Lisa con i propri lineamenti.

Con il suo amore per gli enigmi, Leonardo stesso ci ha offerto quello che potrebbe essere un indizio molto importante nell'intreccio continuo di nodi che appare sul

**Le immagini giustapposte di Monna Lisa e di Leonardo da Vinci (*nella pagina a fronte*) rivelano l'unità di un singolo volto. Se l'autoritratto di Leonardo viene ribaltato specularmente e ridimensionato, le labbra, le arcate sopraccigliari, gli zigomi e la forma della testa corrispondono ai tratti di Monna Lisa. Queste somiglianze fanno pensare che Leonardo, che lavorò sul ritratto di Monna Lisa anche in assenza della dama, usasse come modello se stesso, mescolando così al dipinto alcuni lineamenti propri. Modello originale potrebbe essere stata Isabella, duchessa di Aragona. Leonardo aveva realizzato uno studio preparatorio per un ritratto di Isabella in una posa molto simile a quella di *La Gioconda*. (Fu il Vasari, storico del Rinascimento, ad affermare, dando credito a voci, che la donna ritratta fosse Monna Lisa del Giocondo, da cui il nome tradizionale.) In realtà lo studio non corrisponde all'opera finita, come si vede dall'immagine composita qui sopra. Al di là di una somiglianza superficiale, gli occhi, il naso e la bocca sono diversi. Lo studio di Isabella corrisponde invece a uno schizzo che l'analisi ai raggi X ha rivelato al di sotto di Monna Lisa. In una trasformazione al calcolatore (*a sinistra*) un Leonardo dall'espressione torva si muta in una sorridente Monna Lisa una volta che le rughe e la barba vengono sottratte e gli angoli della bocca vengono rivolti all'insù. Le marcate sopracciglia e la posizione degli occhi non cambiano.**

**Il *Cenacolo* fu dipinto da Leonardo da Vinci nel refettorio di Santa Maria delle Grazie a Milano. L'affresco mostra Cristo e gli apostoli a tavola in una sala che appare come un'estensione del refettorio stesso (*ricostruzione al calcolatore in alto*). Leonardo dipinse le decorazioni sulle pareti lunghe della sala in modo che allineassero visivamente con i bordi degli arazzi visibili nell'affresco. Questo espediente crea un potente effetto di illusione, che si può percepire però solo da un punto di vista collocato a poco meno di cinque metri di altezza dal pavimento; pertanto i visitatori attuali non colgono l'illusione. La ricostruzione al calcolatore (*in basso a sinistra*) rivela però come chi accedesse al refettorio dalla porta originale (*visibile nell'illustrazione in alto*), ora murata, percepisse la cena come se si svolgesse nel refettorio: lo sguardo è attratto prima dalla mano del Cristo, poi dalla testa, segue i bordi degli arazzi interni all'affresco, quindi esce dalla scena e passa nella sala reale.**



corpetto di Monna Lisa. Come ha detto lo storico dell'arte Roy McMullen: «Possiamo essere certi che quei nodi non sono lì per caso». Leonardo era affascinato dai nodi e in un'occasione adattò un motivo ornamentale intrecciato per decorare il proprio nome. La parola italiana che designa i rami di salice usati per intrecciare canestri è «vinco». L'assonanza fra vinco e Vinci rivela l'identità del modello de *La Gioconda*: Leonardo stesso.

Pochi anni più tardi un altro rompicapo leonardesco attirò la mia attenzione. Gli studiosi hanno lungamente discusso su quale fosse il punto di osservazione ideale per vedere il *Cenacolo*, affrescato su una parete del refettorio di Santa Maria delle Grazie a Milano. Leonardo dipinse arazzi all'interno della scena rappresentata e fasce decorative sulle pareti adiacenti del refettorio. Gli arazzi e le decorazioni non sembrano allineati, a meno che non si osservi l'affresco da un punto collocato a poco meno di cinque metri di altezza. Sembrerebbe che Leonardo volesse fare apparire l'affresco come un'estensione del refettorio, ma l'illusione non funziona.

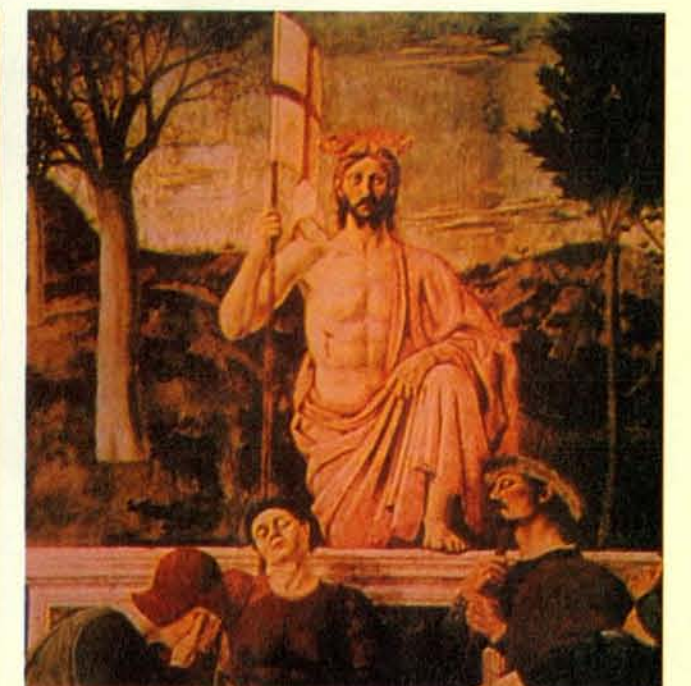
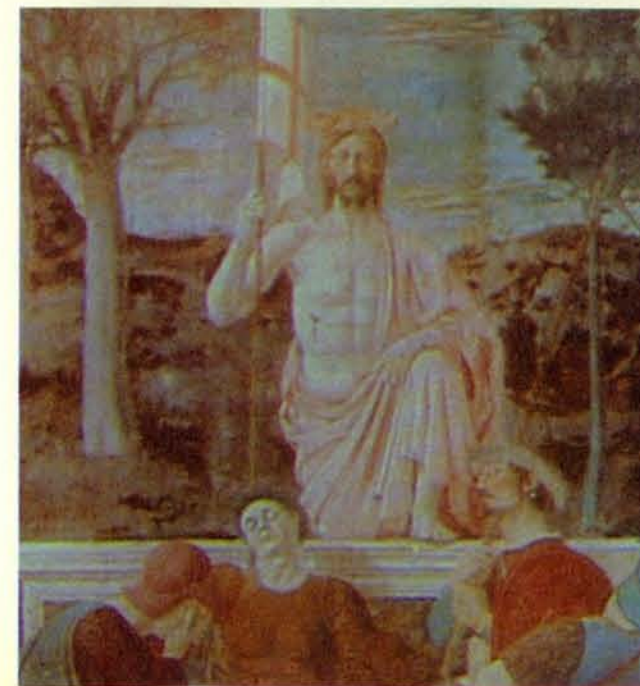
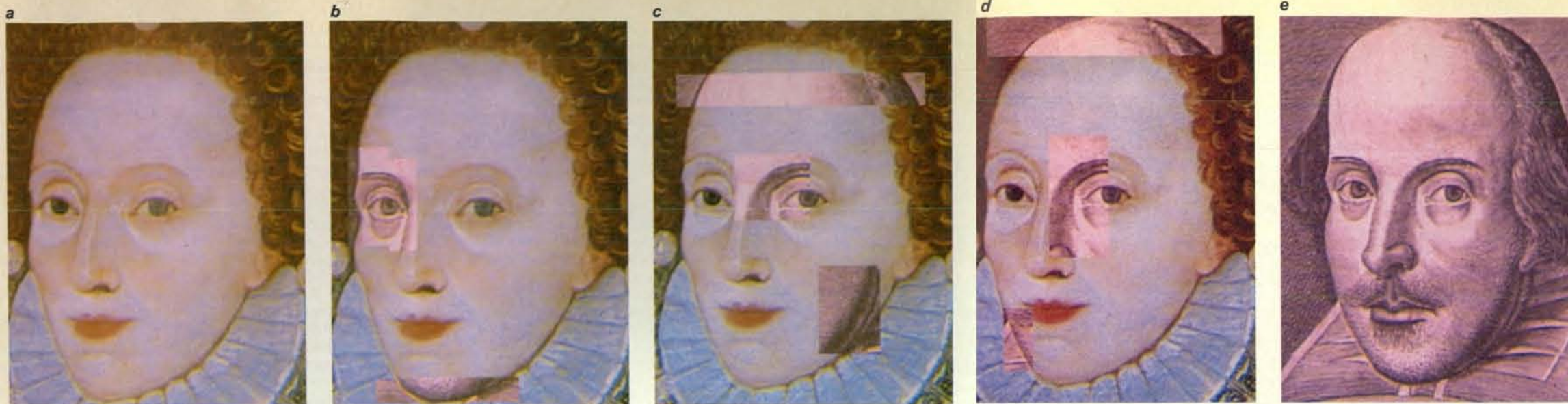
Con il calcolatore, ho costruito una sala tridimensionale simile a quella rappresentata nell'affresco, in modo da poterla osservare sotto differenti punti di vista. Al posto di una vera prospettiva lineare, Leonardo usò una prospettiva «accorciata», come si fa spesso nelle scene teatrali. Nel creare il dipinto - quasi allestisse un palcoscenico - egli mise il Cristo e gli apostoli in vista frontale, inclinò il pavimento e la tavola, disegnò pareti laterali di lunghezze diseguali e arazzi di dimensioni diverse, irregolarmente spaziati.

Esistono, come ho scoperto, altri punti del refettorio da cui le linee delle decorazioni sulle pareti sembrano prolungarsi in quelle degli arazzi interni all'affresco. La porta principale del refettorio, ora murata, immetteva nella sala permettendo di osservare il dipinto da una vista obliqua. Chi entrava, gettando un primo sguardo sull'affresco, percepiva la scena come se si stesse svolgendo all'interno del refettorio, e il Cristo con le mani distese sembrava accogliere il nuovo venuto. La vista laterale del dipinto dava ai monaci seduti al desco (le tavole erano disposte lungo le pareti laterali) l'impressione di consumare i pasti in compagnia del Cristo. Nella ricostruzione al calcolatore ho anche potuto mostrare come i piedi del Cristo (distrutti dalla successiva apertura di una porta che interrompe la parte inferiore dell'affresco, ma ben visibili in una copia precedente) appaiano sospesi sopra il pavimento, quasi a prefigurare la crocifissione.

Recentemente Patricia Trutty-Coohill, della Western Kentucky University, mi ha spinto a occuparmi di nuovo del lavoro di Leonardo: questa volta delle sue 700 caricature. Furono esse puro frutto della fantasia oppure egli si ispirò a volti reali? Queste facce bizzarre lasciano perplessi molti storici dell'arte, in quanto appaiono assai lontane dai canoni di proporzione che Leonardo aveva stabilito per il disegno dei volti.

Misurando i tratti dei volti e i loro allineamenti, mi sono accorta con sorpresa che le caricature sono in effetti «normali». Leonardo aveva modificato solo quelle parti su cui le sue regole concedevano un margine di libertà, esagerando mento, naso, bocca e fronte. Come egli affermava: «la distanza dal sopracciglio al punto in cui il labbro si connette al mento... all'angolo (posteriore) della mascella... al limite superiore dell'orecchio... forma un perfetto quadrato, il cui lato corrisponde a metà dell'intera testa». Le caricature sembrano verosimili in quanto hanno proporzioni «corrette»: Leonardo utilizzò una «armatura» normale, come ipotizzato da Kenneth Clark.

Fortemente stimolato dalle possibilità di analisi offerte dal

**La *Resurrezione di Cristo*, un affresco eseguito da Piero della Francesca nel XV secolo, venne scialbata nel corso del XVII secolo. Sebbene parte della scialbatura sia stata rimossa, i colori dell'affresco risultano ancora sbiaditi (*sotto a sinistra*). Sottraendo elettronicamente lo strato biancastro, l'autrice ha scoperto che l'affresco venne dipinto in toni di colore caldi (*in basso a destra*). Ingrandendo e rendendo più luminosa l'immagine sullo schermo del calcolatore, si è scoperto che l'albero a sinistra nell'affresco è - simbolicamente - spinoso. Inoltre il Cristo ha un orecchio «a cavolfiore», forse perché così lo aveva il modello usato da Piero.**

**Il ritratto della regina Elisabetta I, eseguito da George Gower (*a*), non appare a prima vista molto simile a quello di Shakespeare eseguito da Martin Droeshout (*e*). Tuttavia molti lineamenti coincidono perfettamente. In queste immagini alcune parti del ritratto di Shakespeare sono sovrapposte a quello della regina. In *b* i contorni della parte destra del volto corrispondono, e così pure il mento, ma la larghezza dell'occhio è minore. Come si vede in *c*, se un frammento della fronte viene allineato a destra, le attaccature dei capelli coincidono a sinistra. Una seconda linea curva verso l'alto a partire dal mento della regina. Dato che erano visibili i contorni di entrambe le mandibole, Droeshout mascherò l'area con un'ombreggiatura, alzò l'attaccatura dei capelli e mise in posizione la fronte della regina. L'effetto è la strana fronte a bulbo che appare nel ritratto. In *d* la fronte della regina continua in quella di Shakespeare; la mandibola destra corrisponde; l'occhio sinistro va a posto. Questi e altri dettagli fanno pensare che il volto di Shakespeare sia stato copiato da un bozzetto per un ritratto di Elisabetta.**

calcolatore, il compianto storico dell'arte Eugenio Battisti mi propose di studiare il colore degli affreschi di un altro artista italiano: Piero della Francesca. La *Resurrezione di Cristo*, che si trova a Sansepolcro, era stata scialbata. Parte di questo rivestimento è stata poi asportata, ma si trattava di un restauro completo? I restauratori dovevano sapere quali potessero essere i colori originali prima di procedere nel loro lavoro.

Per studiare questo affresco ho scelto un sofisticato sistema che interpreta la tonalità, la brillantezza e la saturazione di un colore, pixel per pixel. Sottraendo elettronicamente il bianco della scialbatura, ho scoperto che la *Resurrezione* è dipinta con colori che richiamano la luce del tramonto. Battisti rilevò, inoltre, che Piero con ogni probabilità approfittò della luce vespertina che filtrava da un'alta finestra aperta in origine nella parete occidentale dell'edificio per accentuare i colori della propria tavolozza. Evidenziando i dettagli sullo schermo abbiamo anche notato per la prima volta un simbolico albero spinoso su un lato dell'affresco, nonché una curiosità: il Cristo ha un orecchio «da pugile», altrimenti detto «a cavolfiore».

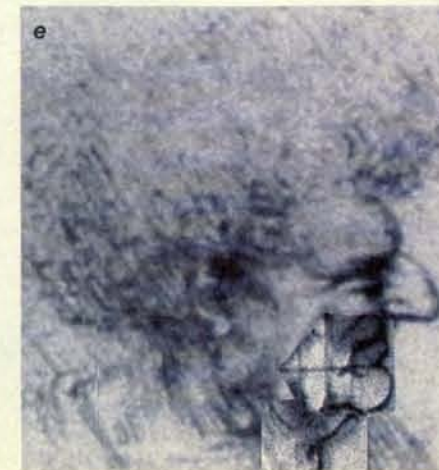
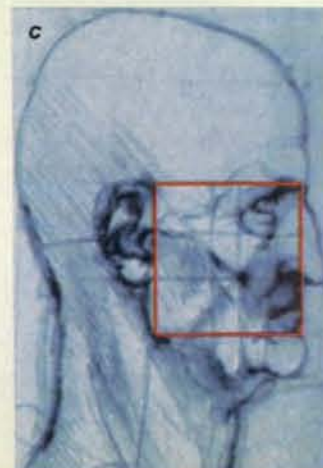
Non lontano dall'Italia, un altro mistero rimaneva irrisolto da secoli. Nel 1990 iniziai a confrontare ritratti di Shakespeare con quelli di suoi contemporanei, sperando così di stabilire l'identità del bardo. Ben presto fui invitata in Inghilterra per continuare questo lavoro. Alcuni studiosi ritengono che il più autentico tra i ritratti di Shakespeare sia quello che accompagna la First Folio Edition delle sue opere, pubblicata nel 1623. Questa incisione, eseguita da un giovane artista, Martin Droeshout, fu criticata un secolo e mezzo più tardi da Thomas Gainsborough con le seguenti parole: «Non ho mai visto una faccia più stupida. È impossibile che una tale mente e un così raro talento si accompagnassero a una faccia del genere». In effetti, la fronte a bulbo di questo ritratto è anatomicamente assurda. La doppia linea del mento - altri hanno sostenuto - rappresenta una maschera.

Confrontando al calcolatore i lineamenti di questo ritratto con quelli del Conte di Oxford e di molti altri notabili dell'epoca mi trovai presto a un punto morto: nessuno sembrava corrispondere. Con la sensazione di avere deluso i miei ospiti, l'ultimo giorno della mia permanenza ritornai alla National Portrait Gallery. Qui, da un ritratto della regina Elisabetta I, mi guardavano fissamente quegli stessi occhi che avevo cercato per intere settimane.

Un confronto dettagliato al calcolatore rivelò che la maggior parte dei lineamenti nell'incisione di Droeshout e nel ritratto di Elisabetta eseguito da George Gower corrisponde. Gli occhi, il naso e la curvatura dei volti sono i medesimi; si riscontra però uno strano spostamento di alcuni tratti. Ho una mia teoria sia sulla somiglianza sia sullo spostamento. Dovendo inventare il volto di Shakespeare, Droeshout deve essersi basato per la sua incisione su uno studio preliminare per il ritratto della regina. Gli artisti fanno spesso ricorso a espedienti di questo genere, e i bozzetti autorizzati della regina, cui dovevano conformarsi tutti i ritratti di Elisabetta, erano ampiamente disponibili.

L'incisione di lastre metalliche è un lavoro molto impegnativo; forse, dopo avere terminato la parte sinistra del volto, Droeshout ritornò sull'incisione qualche tempo più tardi e inavvertitamente (o deliberatamente) spostò il bozzetto. Il contorno di destra, pur seguendo quello del volto di Elisabetta, è dislocato. La testa risulta allungata e a forma di bulbo, e questo fa sì che la mandibola appaia troppo larga per un volto così stretto. Droeshout tentò allora di correggere l'errore: a ciò sarebbe dovuta la doppia linea di contorno.

Se il volto di Shakespeare che accompagna l'edizione delle sue opere sembra essere basato sul bozzetto della regina, continua acceso il dibattito su chi abbia scritto le opere di Shakespeare. Il calcolatore aiuta a risolvere qualche enigma, ma continua a suscitarne altri.

**Le caricature di Leonardo (ne sono qui mostrate due, in *a* e *b*), pur nella loro bizzarria, hanno le stesse proporzioni che l'artista usava per volti normali (*c*). Il sopracciglio è allineato al bordo superiore dell'orecchio, l'orecchio all'angolo posteriore della mandibola, questo all'infossatura del mento e quest'ultima alla parte anteriore del sopracciglio, a formare un quadrato (*in rosso*). Per disegnare le caricature Leonardo esagerò la bocca, il naso o il mento. Se si modifica la scala dei profili e si asporta uno dei tratti lungo le linee suddette, esso si adatta perfettamente a qualsiasi altro volto. Perciò una caricatura può «accettare» un occhio (*d*), o bocca e mento (*e*), da un viso normale, oppure «prestare» il mento a una seconda caricatura (*f*). Con simili *pastiche* è possibile anche comporre volti realistici.**

# La cartografia ambientale informatizzata

*I dati sul territorio acquisiti da satellite ed elaborati con sistemi informatici dedicati arricchiscono il contenuto delle carte tematiche agevolando così una più corretta gestione dell'ambiente*

di Emanuele Loret e Jürg Lichtenegger

La cartografia greca dell'antichità, che produsse raffinate carte geografiche, utilizzò tecniche di misurazione e teorie matematiche elaborate da altri popoli e si servì delle esplorazioni commerciali dei fenici, ma il mondo allora conosciuto comprendeva solamente Europa, Asia e Africa. Bisognò aspettare Colombo e Magellano per avere un'idea dell'altro emisfero.

Dai tempi di Claudio Tolomeo (150 d.C.) la cartografia è sicuramente diventata più complessa. Solo nella seconda metà di questo secolo si è pervenuti a una visione globale e precisa della Terra, soprattutto per merito delle conferme date dalle prime fotografie ottenute dai satelliti artificiali.

La tecnica cartografica che sfrutta fotografie aeree e immagini da satellite si chiama telerilevamento.

Il telerilevamento può essere definito più in generale come l'acquisizione di dati su oggetti reali a distanza, senza contatto diretto. L'esempio più comune è il processo biofisico della visione: in questo caso l'occhio può essere considerato alla stregua di uno strumento ben adattato all'acquisizione di alcuni segnali luminosi. Anche la fotografia (nel campo della radiazione visibile) o le radiografie (alle energie dei raggi X) sono metodi di comunissimo impiego per effettuare rilevamenti a distanza. Ma, in quanto a distanza, è sicuramente l'astronomia ad avere esaltato il telerilevamento al massimo delle sue possibilità, studiando corpi lontanissimi nell'universo. Nelle osservazioni astronomiche sono state utilizzate inizialmente solo le radiazioni elettromagnetiche della luce visibile, con i cannocchiali e i telescopi ottici, e negli ultimi decenni, sfruttando le regioni spettrali dell'infrarosso, dell'ultravioletto e delle microonde, si è ampliata enormemente la massa di informazioni sull'universo.

Recentemente il telerilevamento è stato utilizzato nello studio delle risorse terrestri, sviluppando particolari tecniche per dare il massimo rilievo ai dettagli della superficie terrestre e ottenere in questo modo i dati ormai necessari per programmare interventi nei campi più disparati.

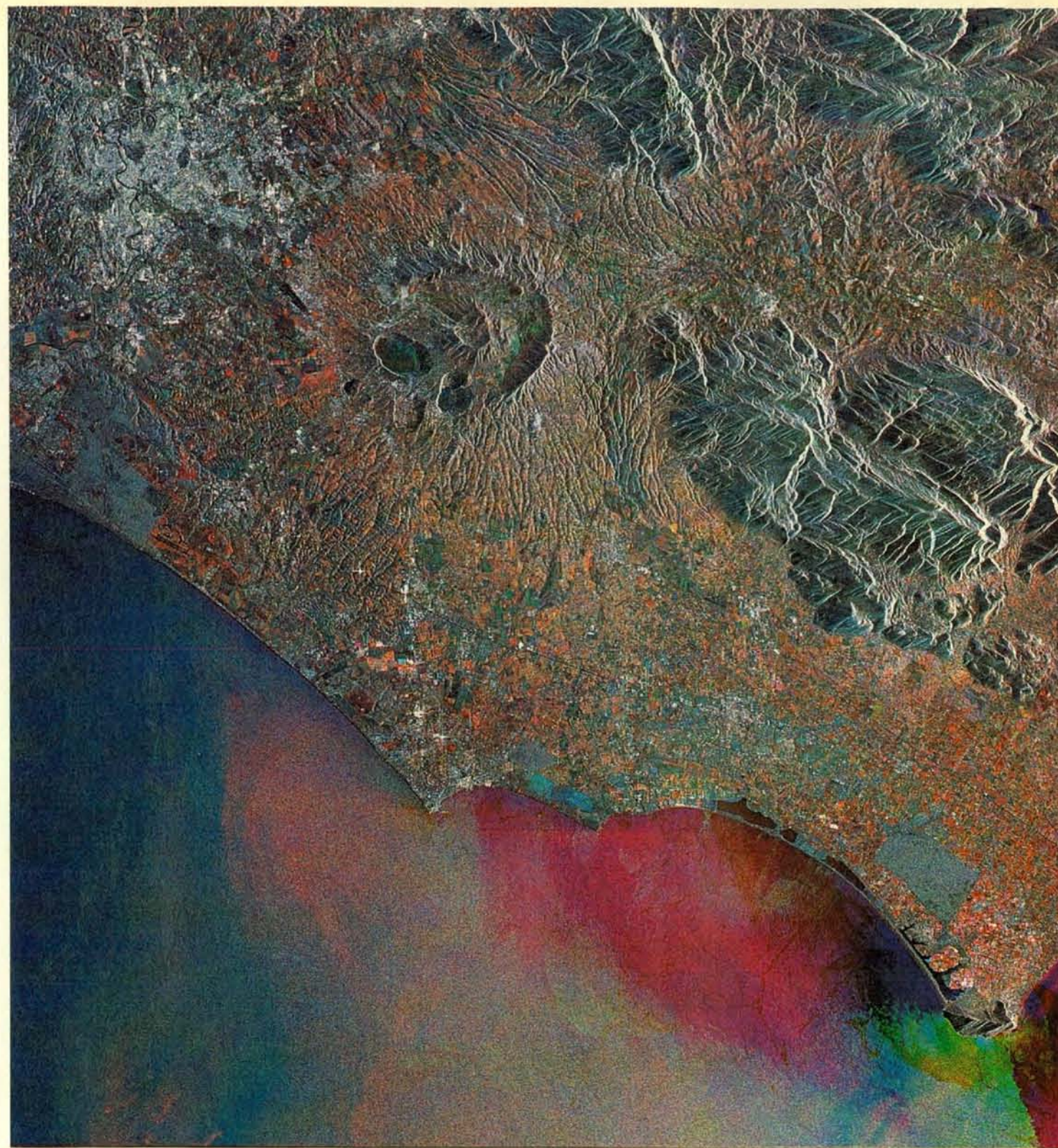
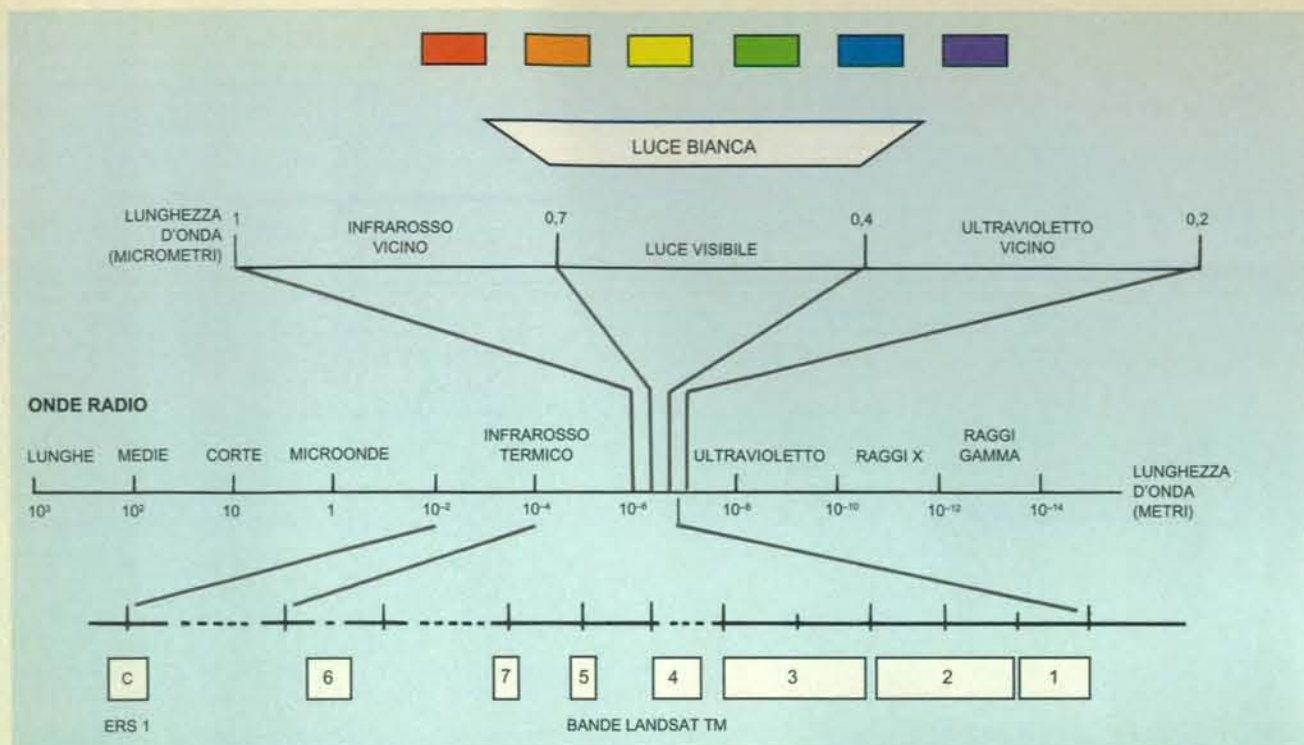
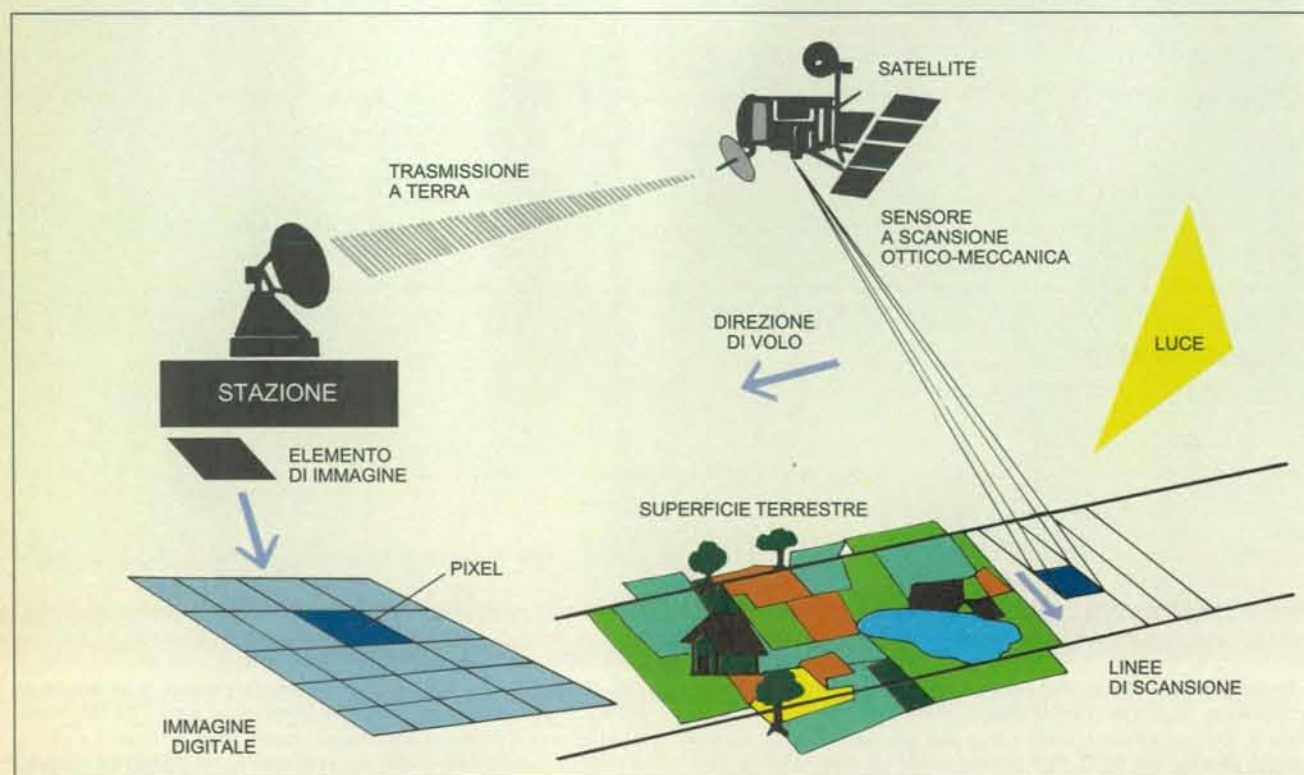
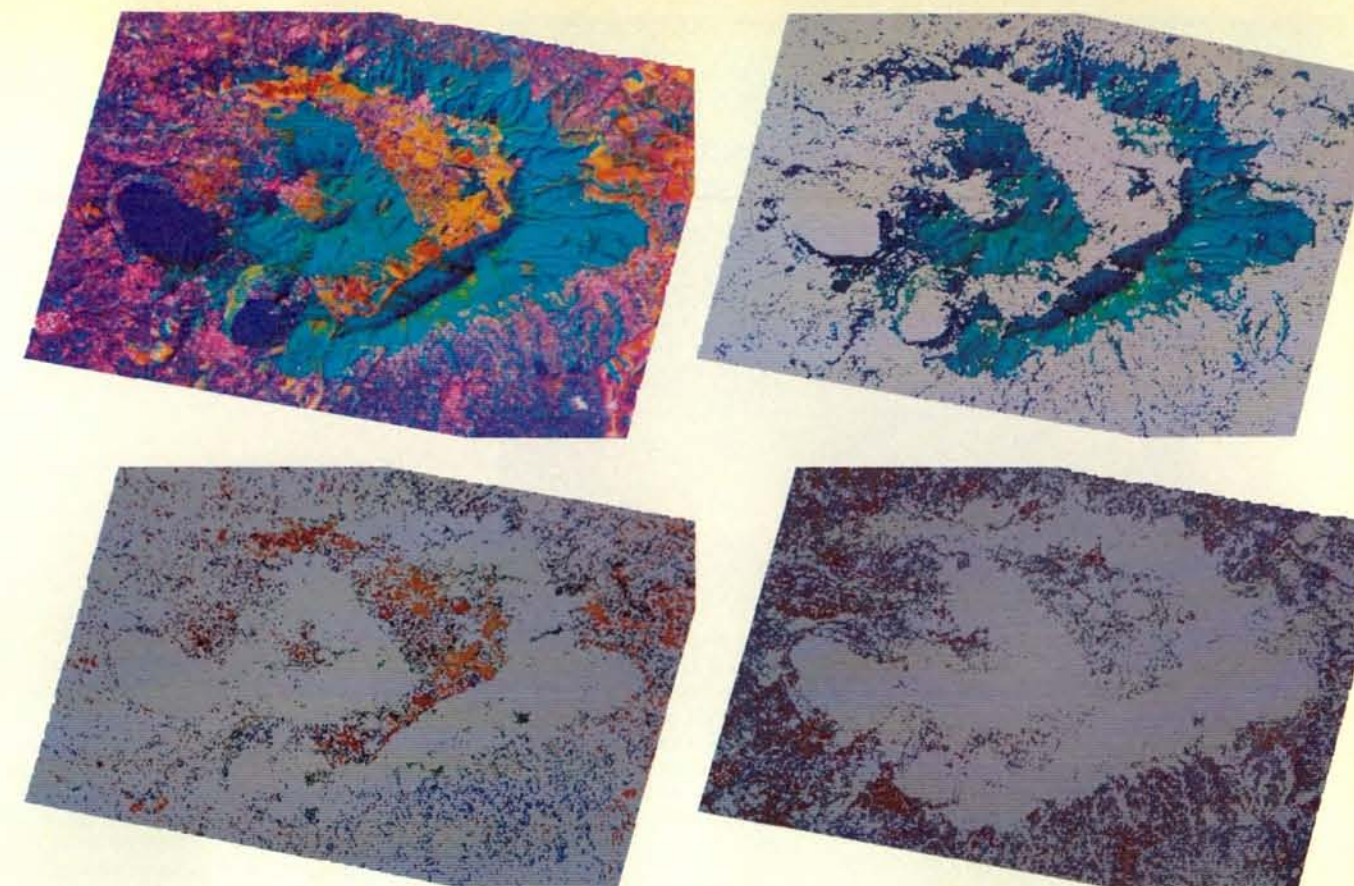
Le informazioni devono essere acquisite in maniera opportuna da appropriati sensori che, con capacità anche al di là della sensibilità umana, captano bande ben definite dello spettro elettromagnetico inviate dagli oggetti naturali e antropici che ricevono la radiazione incidente del Sole o emissioni di altre sorgenti di energia.

Queste misure vengono memorizzate come tonalità di grigio o di colore, rendendo possibile l'individuazione dell'oggetto. Oggetti di natura simile formano infatti classi di toni di grigio o di colore facilmente individuabili: classi tipiche possono essere formate da case, campi coltivati, aree innevate, foreste eccetera.

I sensori passivi (così chiamati per la loro dipendenza da sorgenti emissive esterne) lavorano nella luce visibile e nelle adiacenti porzioni dell'infrarosso e dell'ultravioletto. Questi strumenti, posti su piattaforme (aerei, satelliti, eccetera) convertono l'energia elettromagnetica riflessa dalle superfici degli oggetti reali in segnali elettrici che, una volta inviati a terra e registrati su nastro magnetico, vengono poi tradotti in immagine dopo un'elaborazione analogico-digitale. Le immagini telerilevate trovano ormai applicazione in numerosi campi: geologia, cartografia, botanica, urbanistica, archeologia sono alcune delle discipline che hanno più beneficiato di queste tecniche. Il vantaggio delle immagini da satellite, rispetto alla maggiore definizione delle foto aeree, risiede non solo nel più ampio campo visivo della ripresa (sinotticità), ma soprattutto in una continuità di visione garantita dai ripetuti passaggi a frequenza settimanale (o addirittura giornaliera) che permettono analisi e confronti multitemporali. Da non sottovalutare inoltre il costo relativamente contenuto rispetto alle fotografie necessarie per coprire dall'aereo pari porzioni di territorio.

Molto recentemente la declassificazione delle immagini ottenute da satelliti militari russi ha immesso sul mercato prodotti che addirittura competono in quanto a risoluzione (2 metri × 2 metri) con le fotografie aeree.

Tra i diversi tipi di sensori passivi montati sui satelliti alcuni sono multispettrali e lavorano nelle regioni del visibile e dell'infrarosso termico: di questi l'HRV-SPOT e il TM (Thematic Mapper) del Landsat sono stati utilizzati per lo studio del sistema ambientale dei Castelli Romani. Il 17 luglio 1991 il successo del lancio del satellite ERS 1, dell'Agenzia spaziale europea (ESA), ha fornito nuovi importanti strumenti alle indagini in corso. Infatti i sensori a microonde che equipaggiano questo satellite hanno da subito iniziato a trasmettere informazioni che potranno certamente essere utilizzate per applicazioni simili a quelle dei sensori tradizionali, con l'aggiunta di dati complementari.

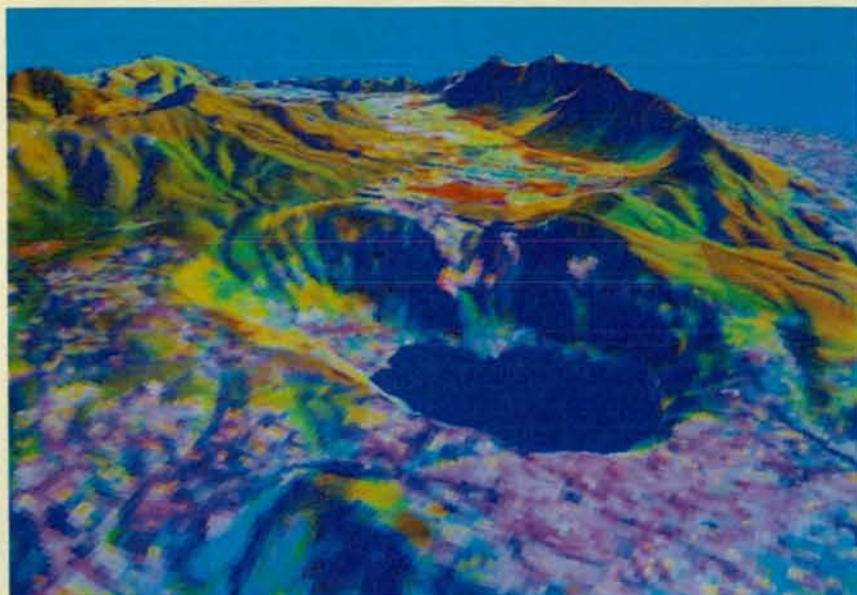
Il vero vantaggio delle microonde sta nel «vedere» la superficie terrestre con qualsiasi condizione meteorologica e anche di notte. Infatti il sensore attivo, detto sorgente di illuminazione, emette un fascio di energia che colpisce gli oggetti superficiali in una stretta banda elettromagnetica, la cosiddetta banda C (5,6 centimetri), che non subisce l'influenza di condizioni meteorologiche sfavorevoli. La radiazione di ritorno, riflessa dal terreno, viene captata dal sa-

**L'immagine multitemporale ottenuta dal satellite ERS 1 mostra Roma e il suo hinterland sudorientale fino al Monte Circeo. Questa sintesi è stata composta sovrapponendo tre immagini riprese nel 1992. Nel canale verde appare la situazione del 3 gennaio, nel canale blu la situazione del 6 marzo, nel canale rosso quella dell'11 giugno. In questa immagine radar il colore rossastro è dovuto alle condizioni dell'11 giugno, una giornata piovosa in cui la vegetazione era in avanzato stato di crescita. ERS 1, satellite dell'Agenzia spaziale europea, percorre un'orbita eliosincrona quasi polare, a una altitudine di circa 785 chilometri. Il carico utile del satellite consiste in più strumenti, tra i quali un sensore a microonde attive (AMI) comprendente un radar (SAR) e uno scatterometro. Esso trasporta inoltre un radaraltimetro, un radiometro (ATSR), un sistema a microonde (PRARE) e un laser retroflettore. Attualmente a ERS 1 è stato affiancato, come previsto, il secondo satellite europeo ERS 2. Quest'ultimo trasporta, oltre a una dotazione di strumenti uguale a quella di ERS 1, anche il GOME (Global Ozone Monitoring Experiment). Tra i compiti di ERS 2 vi sarà infatti anche il rilevamento dell'ozono stratosferico.**

**Microonde, luce visibile e raggi X sono forme della stessa energia che si differenziano per la lunghezza d'onda. I sensori passivi a bordo dei satelliti Landsat utilizzano la radiazione visibile e infrarossa proveniente dal Sole, che ha una lunghezza d'onda dell'ordine dei milionesimi di metro. I sensori attivi del satellite ERS 1 invece emettono segnali e ne ricevono l'eco «lavorando» nella regione spettrale delle microonde, la cui lunghezza d'onda è dell'ordine dei centimetri.**

**I sensori passivi dei satelliti esplorano la superficie terrestre effettuando strisciate parallele lungo quello che si potrebbe definire il «binario» della direzione di volo. Questa scansione, dalla quale deriva il termine «scanner» usato per designare il sensore, misura l'energia riflessa dal terreno e dagli oggetti naturali o antropici. I valori numerici, trasmessi poi a terra in forma analogico-digitale, vengono composti in una scena che, nel caso del sensore Thematic Mapper del Landsat, misura 180 × 180 chilometri. La risoluzione a terra (dimensione del pixel) per questo sensore è 30 × 30 metri.**

**Il paesaggio descritto da un'immagine da satellite può essere separato nelle sue componenti con un processo di classificazione che, estraendo alcuni elementi (o pixel), li assegna a classi diverse sulla base della riflettanza spettrale. Si ottiene quindi una nuova immagine monotematica del paesaggio. Dall'immagine Landsat TM del settembre 1988, georeferenziata (*in alto a sinistra*), sono stati estratti e classificati i boschi (*in alto a destra*), i campi (*in basso a sinistra*) e le aree antropizzate dei Castelli Romani (*in basso a destra*). Le immagini così elaborate, ottime basi cartografico-tematiche per un sistema geografico informatico (GIS), possono essere utilizzate anche sovrapposte tra loro per fornire una sintesi dell'uso reale del suolo.**

tellite stesso, misurata e inviata successivamente a Terra per l'elaborazione.

ERS 1 è il primo di una serie di satelliti radar civili in grado di fornire dati ad alta risoluzione con una regolarità e un'affidabilità mai ottenute prima. Le sue informazioni hanno dato impulso a molte discipline, ma soprattutto hanno consentito l'esplorazione e il monitoraggio di zone finora poco accessibili per mancanza di visibilità, come quelle tropicali o polari. Un'altra importante applicazione di telemisura con il radar di ERS 1, tuttora in corso di sviluppo, è l'interferometria. I primi risultati indicano che fra poco tempo saremo in grado di produrre modelli digitali di ogni tipo di terreno con una precisione forse pari o migliore di quella delle foto aeree. Sarà così possibile registrare i movimenti superficiali della crosta terrestre (per esempio dopo un terremoto) con un errore di pochi centimetri.

Tra i problemi più impegnativi posti dalla progettazione ambientale vi è quello di definire le aree adibite ai diversi usi in modo da ottenere carte tematiche per evidenziare i cambiamenti e per fare previsioni sull'evoluzione di un determinato territorio. L'organizzazione dei dati satellitari consente dopo opportuna elaborazione di produrre immagini che devono essere interpretate per assegnare colori, tessiture e geometrie caratteristiche a determinate classi di oggetti come boschi, strade, insediamenti. L'analisi di una immagine individua quindi un tipo di uso del suolo e consente di misurare superfici parziali o totali di ogni tipo o categoria selezionata, per esempio bosco, arativo, abitato, eccetera.

Con l'aiuto di programmi oggi molto diffusi anche su Personal Computer, i dati del satellite possono essere presentati sullo schermo, permettendo all'operatore di individuare e selezionare campioni di ogni classe di oggetti. Questi ultimi serviranno come esempio al calcolatore che opererà confrontando, scegliendo e associando insieme tutti i dati numerici «simili» (Supervised Classification). Il risultato finale è un'immagine simile a una carta tematica che potrà anche presentare tabelle con l'indicazione delle superfici. Facciamo l'esempio dell'estensione dei boschi: il satellite può permettere di individuare automaticamente, oltre che visivamente, ogni cambiamento avvenuto in tempi diversi. In questa maniera, aggiornando a scadenze di qualche anno i dati, è possibile programmare facilmente la gestione anche di grandi estensioni di territorio o di porzioni più piccole, ma più «preziose», come quelle di un parco.

Una recente applicazione in cui lo sfruttamento delle immagini così classificate è particolarmente avanzato è la rappresentazione cartografica dell'uso del suolo nella moderna versione di sistema informativo. Gli studi specialistici di morfometria, geologia, idrografia, urbanistica eccetera, considerati a sé, hanno un valore del tutto limitato se non vengono inquadrati in un contesto più vasto di insieme. La rappresentazione di questi «livelli» complessi di pianificazione, un tempo tecnicamente ardua e costosa, viene oggi realizzata agevolmente con l'ausilio dei cosiddetti sistemi informativi territoriali, e più nello specifico con i sistemi geografici informatici (GIS). Un GIS è un modello integrato di informazioni relative al territorio, inserito in un calcolatore e «inter-

L'immagine tridimensionale, costruita da una immagine Landsat TM dell'aprile 1991 con l'ausilio di un modello digitale del terreno, mostra il lato sudoccidentale del grande Vulcano Laziale. Al centro si osserva il cratere che ospita il lago di Nemi, a sinistra l'apparato delle Faete, a destra la cinta craterica esterna. In primo piano (*in rosa*) sono le aree urbane, ormai saldate tra loro, di Ariccia e Genzano. In un sistema geografico informatico le immagini tridimensionali sono utilissime per studiare la morfologia del luogo e per definire i «coni di visuale» per le norme di tutela del paesaggio nelle procedure di valutazione di impatto ambientale (VIA).

rogabile» dagli utenti tramite un linguaggio appropriato. Le informazioni contenute nel GIS vengono rese interattive, in modo da ottenere dati quantitativi in tempo reale. Al momento della richiesta dell'utente queste informazioni sono restituite in molti livelli sovrapponibili (*layer*) rendendo più agevole la lettura. La restituzione dei dati può avvenire sullo schermo del calcolatore, sulla carta di un *plotter*, in tabulati o ancora sotto forma di semplici numeri, il tutto corredato dagli attributi informativi richiesti.

**Sintesi cartografiche multidisciplinari, che richiedevano un grande dispendio di tempo e lavoro, vengono ora elaborate rapidamente con i sistemi geografici informatici (*nella pagina a fronte in alto*). Un GIS è un modello nel quale vengono inseriti più livelli di informazioni che possono essere messi in relazione reciproca. È pertanto possibile ottenere risposte complesse sotto forma di carte tematiche che permettono la visualizzazione di fenomeni naturali o antropici anche in prospettiva futura, per una adeguata programmazione territoriale.**

Si possono facilmente immaginare le numerose possibilità di «intreccio» delle varie informazioni. Ogni problema non solo può essere esaminato rapidamente sotto diversi punti di vista, ma può soprattutto essere estrapolato in prospettiva futura, permettendo di elaborare più ipotesi di fattibilità, per anticipare future situazioni anche critiche e realizzare così in concreto quella tanto invocata «programmazione».

Esaminiamo ora un progetto per la costruzione di un GIS per l'area sudorientale di Roma, concepito a scopo dimostrativo presso l'ESA/ESRIN di Frascati per illustrare agli amministratori dei parchi le possibilità di uno strumento di consultazione versatile e potente, in grado di fornire analisi generali e dettagliate sui problemi ambientali. Il modello, elaborato su software System9 (UNISYS), prende in considerazione più superfici (dati *raster*) espresse come estensione boschi, estensione abitati, estensio-

## I problemi dei parchi nell'area romana

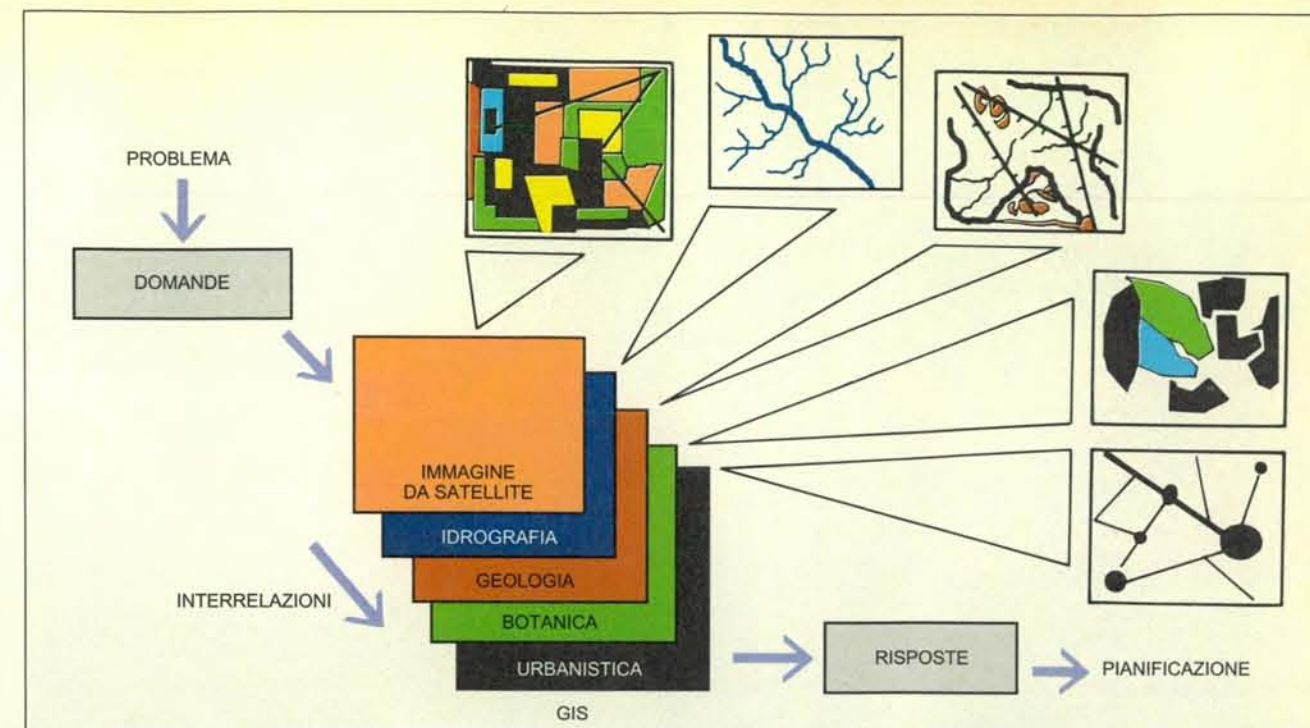
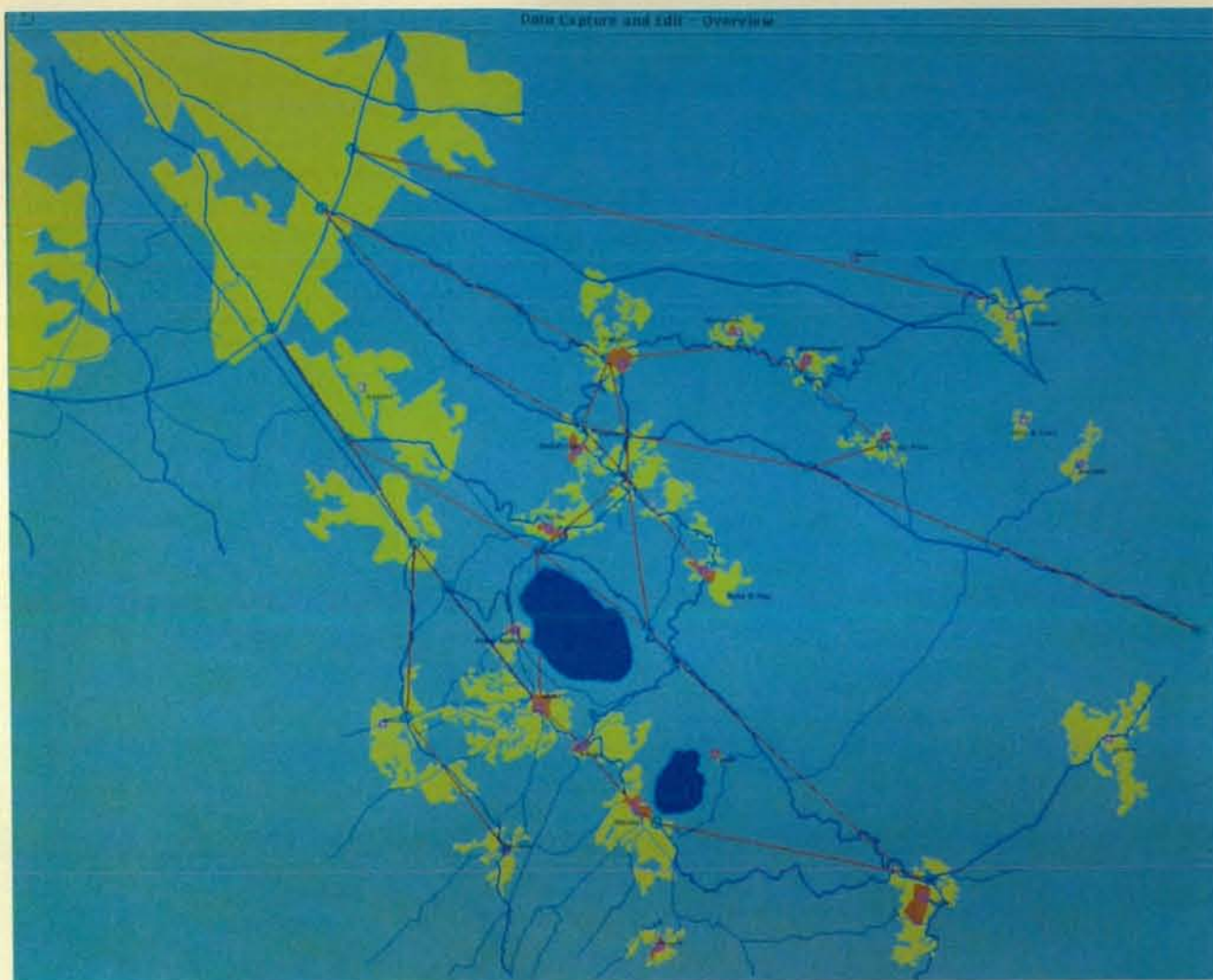
La proposta dell'istituzione di un parco nell'area del grande Vulcano Laziale, nata da una diffusa esigenza di tutela dell'ambiente naturale, venne avanzata fin dal 1976 da un forte Comitato promotore sulla base di numerose segnalazioni in ambito scientifico. Infatti, già la Società botanica italiana (dal 1971) e la Commissione del CNR per la «Conservazione della natura e delle sue risorse» avevano individuato, tra gli altri, il biotopo «Colli Albani» nella Carta regionale dei biotopi del Lazio come area di alto valore naturalistico e quindi meritevole di salvaguardia.

Tuttavia l'idea di parco poté concretizzarsi solo dopo il varo della Legge regionale n. 46 del 28/11/1977, quando si cominciò a parlare di un sistema di parchi regionali e riserve naturali con fini sociali, ricreativi, scientifici, didattici e culturali. Con il coinvolgimento dei Comuni e della Provincia la proposta di legge istitutiva del parco venne varata il 17/7/1979 dalla Giunta regionale del Lazio con l'iniziale individuazione di un'area di circa 13 450 ettari.

Tra la deliberazione di legge e l'istituzione vera e propria del parco passarono però 5 anni. Il Parco dei Castelli Romani venne effettivamente istituito con le Leggi regionali n. 2 e n. 64 del 1984 con una perimetrazione provvisoria comprendente circa 9000 ettari. La gestione del parco è affidata a un consorzio formato dai 15 Comuni afferenti all'area dei Castelli, dalla XI Comunità montana e dalla Provincia di Roma.

Il parco è attualmente commissariato. Dopo 10 anni dalla sua istituzione, si sta finalmente delineando e varando un piano di assetto con la collaborazione della commissione tecnico-scientifica prevista dalla legge istitutiva.

Anche per il Parco dell'Appia Antica esistono problemi: istituito nel settembre 1988 per legare insieme, in un *unicum* territoriale, testimonianze paesistiche, storiche e archeologiche veramente singolari, il Parco dell'Appia raccoglie lineamenti morfologici tipici della quasi scomparsa «campagna romana». In esso le acque e i paesaggi vegetali si legano alle strutture archeologiche e storiche, viste come sistema unitario, dai Fori fino alle Frattocchie e, attraverso il Parco dei Castelli, al Tuscolo.

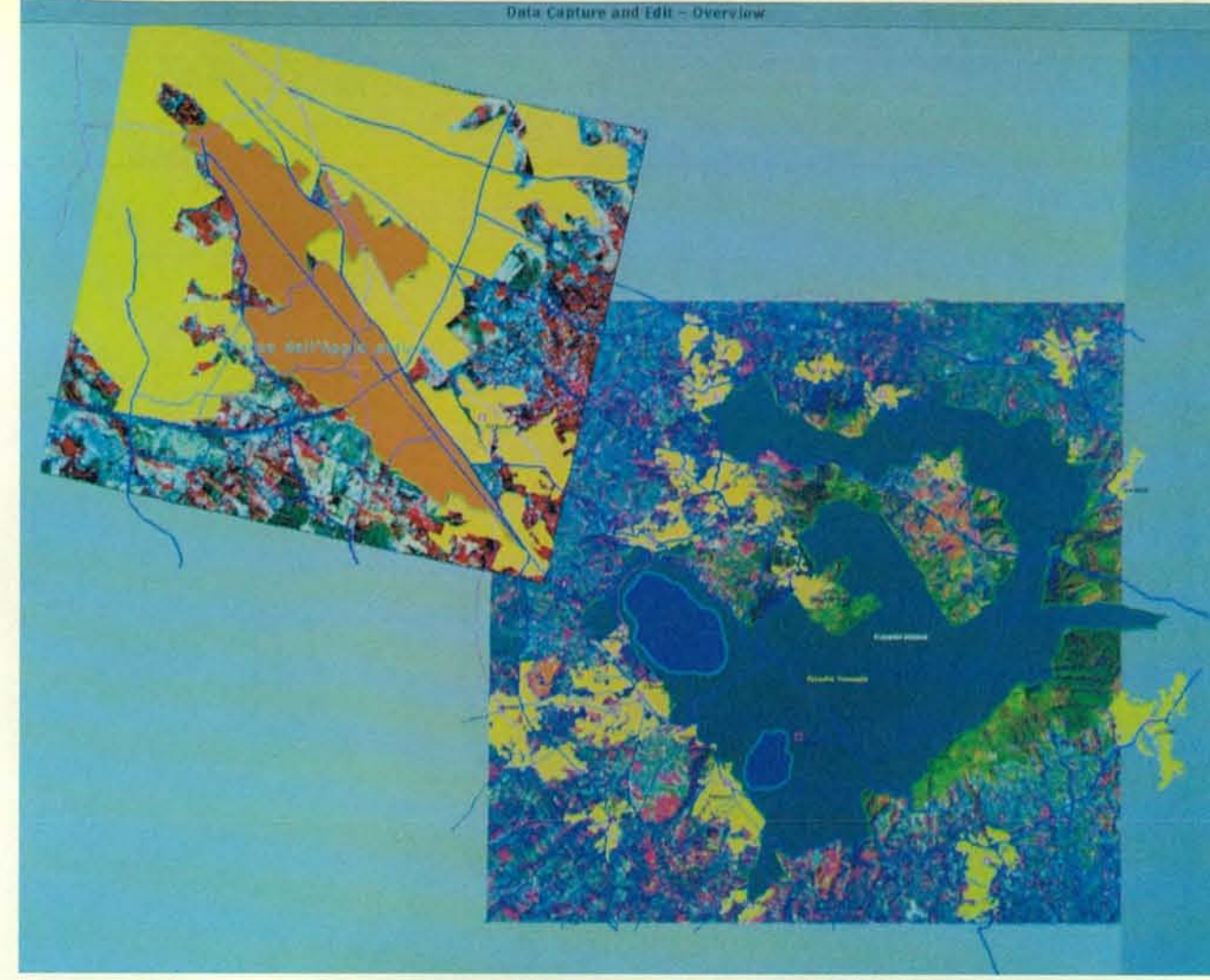
L'operatività del parco è tuttavia fortemente limitata dalla perdurante mancanza di una sede, di fondi, di personale tecnico, amministrativo e di vigilanza. Tenacemente difeso da uomini di cultura e associazioni ambientaliste, il parco è, almeno sulla carta, una realtà. Tuttavia il lungo periodo di mancanza di azioni concrete ha favorito la ripresa di gravi forme di degrado e abusivismo, di privatizzazioni e di trasformazioni di uso che ne renderanno più difficile l'attuazione. (*Emanuele Loret*)

La crescita dei centri costituenti il sistema urbano dei Castelli Romani ha provocato inquinamento idrico nei pozzi che alimentano gli acquedotti in molti Comuni, causandone spesso la chiusura. Si vedono in giallo le aree urbane «compatte», in blu i corpi d'acqua, le sorgenti e le aree di rispetto, in verde chiaro la isopieza della falda di base, in rosso i confini comunali, in marrone le principali elevazioni del cratere del Vulcano Laziale. (Immagine GIS su System9 UNISYS.)

**I principali flussi di mobilità verso Roma fanno segnare ogni giorno una massiccia concentrazione di traffico verso la X e l'VIII Circoscrizione. Il grafo dei flussi è come un enorme imbuto che raccoglie le automobili provenienti dal sistema urbano dei Castelli Romani. In rosso si vedono le aree urbane con l'estensione che avevano negli anni cinquanta, in giallo l'estensione urbana nel 1991; le linee rosse sono i flussi e i cerchietti azzurri i maggiori nodi. (Immagine GIS su System9 UNISYS.)**

ne arativo, superfici comunali, superfici adibite a parco eccetera, in relazione con dati lineari (vettoriali) come rete viaria, perimetri amministrativi, linee di spartiacque, curve di livello eccetera e, ancora, in relazione con dati puntiformi come localizzazione di sorgenti, fontanili, monumenti, rovine, punti di interesse botanico, discariche eccetera.

Per estrarre le informazioni di base è stato utilizzato materiale di diversa natura: dalle carte dell'Istituto geografico militare a quelle tematiche da esse derivate, alle carte geologiche e botaniche, a quelle economico-politiche, catastali, stradali eccetera. Oltre a ciò immagini telerilevate da aerei o da satelliti, elaborate o grezze, a partire dal 1985 sono state usate come fonte di dati per un aggiornamento rapido e preciso di informazioni soggette a invecchiamento.

Questo procedimento ha consentito di verificare numerosi fenomeni in evoluzione nel territorio: uno di questi è la dinamica dell'inquinamento idrico del sottosuolo. Come è ben noto, l'inquinamento di una falda idrica è molto insidioso dato che, quando diviene evidente, le possibilità di risanamento dell'area interessata sono ormai quasi inesistenti. Sovrapponendo così l'«area di rispetto» delle principali sorgenti e di alcuni pozzi della zona albana con le più recenti immagini da satellite elaborate sulla tematica dell'espansione edilizia, e conoscendo la condizione di numerosi collettori fognari, nonché la drammatica situazione dei depuratori, risulta chiaro anche ai profani il perché in molti casi la qualità dell'acqua risulti seriamente compromessa.

Anche il problema del traffico è stato analizzato per cercare di suggerire soluzioni diverse da quelle proposte, che altro non prevedono se non la costruzione di nuove strade o il taglio dei cosiddetti «rami secchi» (ferrovie locali, per intenderci). L'espansione urbanistica di Roma e dei paesi dei Colli Albani ha prodotto, infatti, notevoli problemi per i trasporti. Un insieme complesso di nodi e di flussi canalizza il traffico delle automobili, da e per Roma, su tre principali assi viari: via Appia, via Tuscolana-Anagnina, autostrada A2. Le grandi agglomerazioni nate dai centri dell'area sudorientale di Roma producono uno scambio veicolare che, nel 1984, raggiungeva circa il 40 per cento di tutti gli scambi complessivi tra Roma e il suo *hinterland*. Si tratta attualmente di un movimento superiore alle 100 000 unità che contribuisce a penalizzare gli spostamenti di lavoro, incrementando inoltre l'inquinamento e producendo costi tangibili.

Questi e molti altri fenomeni sono visualizzabili con il GIS dei Castelli Romani, che costituisce così la base per una cartografia territoriale multisettoriale di facile comprensibilità. Quali altri usi fare di un prodotto informatico



**Due immagini Landsat, dell'aprile 1991 per il Vulcano Laziale e del giugno 1993 per Roma, servono da base per la proiezione della situazione del sistema territoriale dei parchi (in arancione il Parco dell'Appia Antica, in blu quello dei Castelli Romani). Il perimetro provvisorio di quest'ultimo non comprende una buona metà dei boschi di castagno sulle pendici del recinto craterico. Il giallo indica l'estensione urbana; le linee blu sono le strade principali. (Immagine GIS su System9 UNISYS.)**

così versatile? Per il Parco regionale suburbano dei Castelli Romani, che per il momento è dotato di una perimetrazione provvisoria, il GIS servirà sicuramente all'individuazione di una perimetrazione definitiva sulla base della situazione reale e recente. L'attuale perimetro del parco infatti comprende solo il 56 per cento dei boschi esistenti. In seguito il GIS permetterebbe di programmare rapidamente interventi nelle risorse forestali, nella protezione civile, nella prevenzione degli incendi, e certamente nel futuro sviluppo agricolo ed economico della zona.

Nel 1993 è iniziata la collaborazione anche con il Parco dell'Appia Antica. Quest'ultimo, travagliato da molte vicissitudini, dovrebbe essere l'asse portante di una «spina verde» che dai Castelli Romani arriva fino al centro storico di Roma. Per questo parco il GIS potrebbe facilmente essere usato nell'identificazione e nella localizzazione di aree di sviluppo urbano, per conoscere la situazione degli edifici che ricadono nell'area, nel calcolo della capacità di carico del territorio, nella protezione e nella classificazione delle emergenze archeologiche, nel controllo dell'abusivismo e, infine, nella progettazione di itinerari creando, anche con i mezzi pubblici, percorsi più agevoli per i turisti e per tutti coloro che siano desiderosi di visitare una delle aree archeologiche più interessanti del mondo.

**BIBLIOGRAFIA**

ELACHI CHARLES, *Spaceborne Radar Remote Sensing: Application and Techniques*, IEEE Press, New York, 1988.

GIORDANO A., *Il telerilevamento nella valutazione delle risorse naturali* in «Relazioni e monografie agrarie subtropicali e tropicali», Nuova serie, n. 106, Istituto Agronomico per l'Oltremare, Firenze, 1989.

DANA T. C., *Cartographic Information Systems and Cartographic Modelling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.

DRURY S. A., *A Guide to Remote Sensing-Interpreting Images of the Earth*, Oxford University Press, New York, 1990.

MAREK K.H. e WEIGELT A., *The Third Generation of Space Photography* in *International Mapping from Space; Workshop and Conference (ISPRS)*, vol. 15, IPI, Hannover, 1993.

SCHREIER GÜNTHER (a cura), *SAR Geocoding-Data and Systems*, Wickmann, Karlsruhe, 1993.

# Una breve storia dell'infinito

*Forse nemmeno la concezione sviluppata da Georg Cantor e comunemente accettata in matematica ha dato un fondamento rigoroso allo sfuggente concetto di infinito*

di A. W. Moore

Per più di duemila anni i matematici non hanno saputo bene come trattare l'infinito: molti paradossi formulati da pensatori greci e medievali li avevano convinti che non fosse possibile sondarlo impunemente. Quindi, negli anni settanta del secolo scorso, Georg Cantor elaborò la matematica transfinita, una branca della matematica in apparenza capace di risolvere tutti i rompicapo che l'infinito aveva posto fino a quel punto. Nella sua opera Cantor dimostrava che i numeri infiniti esistono, che possono avere dimensioni diverse e che possono essere utilizzati per misurare l'estensione di insiemi infiniti. Ma davvero la sua teoria ha fugato tutti i dubbi sui rapporti fra la matematica e l'infinito? Quasi tutti oggi pensano di sì, ma io sostengo che Cantor possa avere in realtà rafforzato quei dubbi.

L'ostilità dei matematici nei confronti dell'infinito risale al V secolo a.C., quando Zenone di Elea, discepolo di Parmenide, formulò il famoso paradosso di Achille e della tartaruga. In questo rompicapo, il piè veloce è sfidato nella corsa da una lenta tartaruga, alla quale egli concede un vantaggio iniziale. Prima di poterla raggiungere, egli deve pervenire al punto da cui la tartaruga è partita, ma nel frattempo questa sarà avanzata di un po'. Achille ora deve coprire la nuova distanza che li separa, ma quando l'avrà fatto, la tartaruga sarà avanzata ancora di un po'. E così si procede, *ad infinitum*. Sembra che Achille non possa mai raggiungere la tartaruga. Analogamente Zenone sosteneva l'impossibilità di una corsa nello stadio: per poter compiere un giro completo l'atleta dovrebbe raggiungere prima il punto a metà percorso, poi quello a tre quarti, poi quello a sette ottavi e così via. Zenone ne concludeva non solo che il moto è impossibile, ma che è meglio non pensare in termini di infinito.

Il matematico Eudosso, pure diffidente verso l'infinito, sviluppò il cosiddetto metodo di esaustione per aggirarlo in taluni contesti geometrici. Circa un secolo dopo Archimede utilizzò quel metodo per trovare l'area del cerchio. Nella finestra a pagina 78 presento non l'effettiva dimostrazione, ma una sua «distorsione». Parte del procedimento di Archimede consisteva nel considerare la formula per l'area di un poligono con $n$ lati uguali (chiamiamolo $P_n$) inscritto in un cerchio $C$. Secondo la versione distorta della sua argomentazione, questa formula può essere applicata al cerchio stesso, che è semplicemente un poligono con un numero infinito di lati infinitamente piccoli.

Questo espediente ha un certo fascino intuitivo, ma non avrebbe soddisfatto Archimede. Non possiamo utilizzare acriticamente l'infinito come se non fosse altro che un intero particolarmente grande. Al crescere di $n$, $P_n$ approssima sempre meglio $C$; ma è anche vero che, al crescere di $n$, $P_n$ approssima sempre meglio un cerchio con un rigonfiamento, che possiamo chiamare $C^*$. Intuitivamente il punto nodale è che $C$, a differenza del suo corrispondente deformato $C^*$, è il limite dei poligoni, la figura a cui tendono.

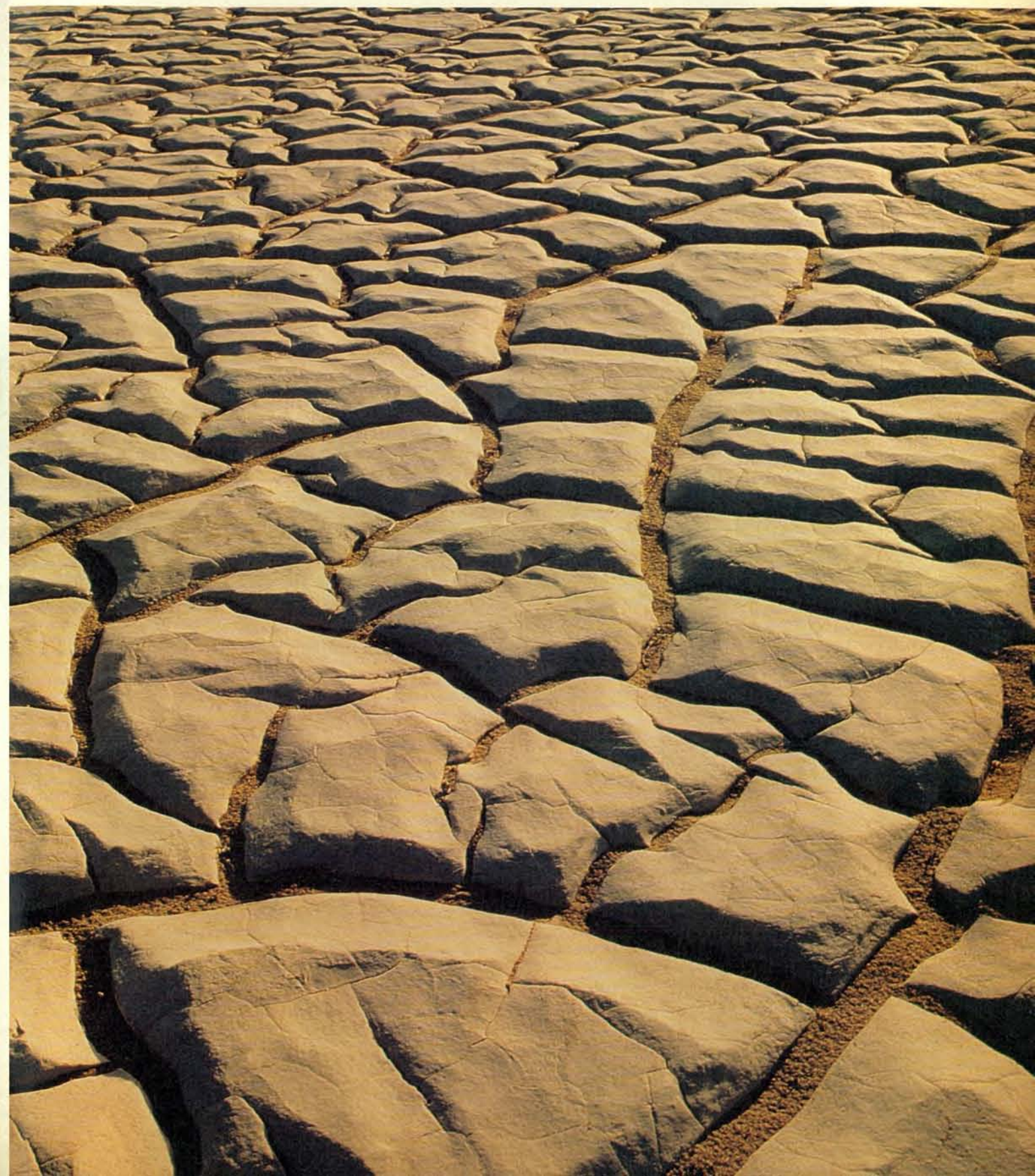
È molto difficile, però, intravvedere un metodo per «catturare» questa intuizione, senza immaginare ancora una volta $C$ come un «infinigono». Archimede riuscì invece a mettere in luce la differenza cruciale fra $C$ e $C^*$, dimostrando che, se si considera un'area $\varepsilon$ piccola a piacere, esiste sempre un intero $n$ abbastanza grande perché l'area di $P_n$ differisca dall'area di $C$ per meno di $\varepsilon$. La stessa cosa non vale per $C^*$. Questo fatto, combinato con un risultato simile relativo ai poligoni circoscritti e perfezionato nei suoi aspetti logici, consentì infine ad Archimede di dimostrare, senza mai chiamare in causa l'infinito, che l'area del cerchio è uguale a $\pi r^2$.

### *Infinito attuale e infinito potenziale*

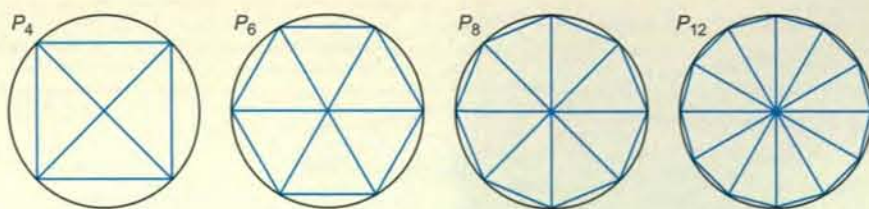
Archimede riuscì a eludere l'infinito in questo caso particolare, ma i pitagorici si imbatterono in un caso in cui era proprio impossibile sfuggire all'infinito. Questa scoperta mandò in frantumi la loro fede in due princìpi cosmologici fondamentali: *Peras* (il limite), che racchiudeva tutto ciò che è bene, e *Apeiron* (l'illimitato o infinito) che racchiudeva tutto ciò che è male. Essi pensavano che tutto il creato potesse essere inteso (e in ultima istanza fosse effettivamente formato) in termini di interi positivi, ciascuno dei quali è finito. Questa riduzione era possibile, sostenevano, perché Peras dominava sempre Apeiron.

Pitagora però aveva scoperto che il quadrato costruito sull'ipotenusa di un triangolo rettangolo è uguale alla somma dei quadrati costruiti sui cateti. In base a questo teorema, la diagonale di un quadrato sta a uno dei suoi lati come $\sqrt{2}$ sta a 1, perché $1^2 + 1^2 = (\sqrt{2})^2$. Se Peras fosse stato impenetrabile, questo rapporto avrebbe dovuto potersi esprimere nella forma $p/q$, con $p$ e $q$ interi positivi. Questo però è impossibile. Immaginate due interi positivi $p$ e $q$ il cui rapporto $p/q$ sia equivalente a $\sqrt{2}$. Possiamo ipotizzare che $p$ e $q$ non abbiano fattori comuni oltre a 1 (se necessario, potremmo semplificarli). In questo caso, $p^2$ è il doppio di $q^2$; perciò $p^2$ è pari, e di conseguenza deve esserlo anche $p$. Allora $q$ deve essere dispari, altrimenti i due numeri avrebbero in comune il fattore 2. Ma se $p$ è pari, deve esistere un intero positivo $r$ che sia esattamente la metà di $p$. Perciò $(2r)^2 = 2q^2$, ovvero $2r^2 = q^2$, il che significa che $q^2$ è pari, e deve essere pari anche $q$, in contraddizione con quanto si è dimostrato prima.

Per i pitagorici questo risultato fu catastrofico. (Secondo la leggenda, uno di loro fu buttato in mare e morì per aver divulgato la scoperta ai nemici.) Essendosi imbattuti in un numero «irrazionale», avevano visto i limiti degli interi positivi ed erano stati costretti ad ammettere la presenza dell'infinito proprio al loro interno. In effetti, un matematico moderno direbbe che $\sqrt{2}$ è un tipo di «oggetto infinito»: il suo sviluppo decimale, infatti, non solo è infinito, ma anche aperiodico: non contiene uno schema di cifre che si ripeta con regolarità.

Nel quarto secolo a.C., Aristotele identificò un problema più generale. Da un lato siamo spinti a riconoscere l'esistenza dell'infinito. Al di là di quello

**Il terreno riarso della Death Valley, in California, fa pensare a un'estensione illimitata. Per comprendere l'infinito, i matematici hanno dovuto affrontare molti paradossi, concludendo che vi sono tipi diversi di infinito e che alcuni sono più grandi di altri.**

## Archimede e l'area del cerchio

Come venne utilizzato da Archimede il metodo di esaustione per trovare l'area del cerchio? Ecco la versione corrotta del suo ragionamento. Prendiamo un cerchio $C$ di raggio $r$. Per ogni intero $n$ maggiore di 2, possiamo costruire un poligono regolare con $n$ lati e inscriverlo in $C$. Questo poligono $P_n$ può essere suddiviso in $n$ triangoli congruenti. Chiamiamo $b_n$ la base di ciascun triangolo e $h_n$ la sua altezza; l'area è 1/2 $b_n h_n$. Perciò l'area totale di $P_n$ è $n$ (1/2 $b_n h_n$), ovvero 1/2 $nb_n h_n$. Ma $C$ stesso è un poligono con un numero infinito di lati infinitamente piccoli. In altre parole, quando si estende la definizione originale di $P_n$ e si ammette che $n$ sia infinito, il risultato è $C$. In questo caso, $nb_n$ è la circonferenza di $C$, che è pari a $2\pi r$ (il che segue dalla definizione di $\pi$) e $h_n$ è il raggio $r$. Perciò l'area di $C$ è $1/2(2\pi rr)$, ovvero semplicemente $\pi r^2$.

che possiamo dire di $\sqrt{2}$, il tempo sembra continuare indefinitamente, i numeri sembrano procedere senza fine, e spazio, tempo e materia sembrano divisibili all'infinito. Dall'altro lato vari elementi, fra cui i paradossi di Zenone, ci spingerebbero a ripudiare l'infinito.

La soluzione di Aristotele fu magistrale. Egli tracciò una distinzione fra due tipi di infinito: l'infinito attuale è quello la cui infinitezza si presenta in un momento ben definito; l'infinito potenziale è quello la cui infinitezza è distribuita nel tempo. Le obiezioni all'infinito, secondo Aristotele, sono obiezioni all'infinito attuale; quello potenziale, invece, è una caratteristica fondamentale della realtà. Deve essere riconosciuto in tutti i processi che possono non avere mai fine, come il contare, la divisione della materia e lo stesso scorrere del tempo. La distinzione fra i due tipi di infinito dava una soluzione ai paradossi di Zenone. Attraversare una regione di spazio non comporta l'attraversamento di un'infinità attuale di sottoregioni, cosa che sarebbe impossibile, ma significa attraversare una infinità potenziale di sottoregioni, nel senso che non può esserci fine al processo di suddivisione dello spazio. Questa conclusione, per fortuna, è innocua.

La distinzione aristotelica fra infinito attuale e infinito potenziale rappresentò a lungo la concezione ortodossa. Il suo riferimento al tempo fu però interpretato come una metafora per qualcosa di più profondo e più astratto. Esistere «nel tempo» o esistere «contemporaneamente» assunsero significati più ampi. Fare obiezione all'infinito attuale significava obiettare alla stessa idea che qualche ente potesse avere una proprietà superiore a ogni misura finita e persino negare che l'infinito in sé fosse un legittimo oggetto di studio.

Circa 2000 anni più tardi l'infinito, sia attuale sia potenziale, mise ancora una volta alla prova i matematici. I primi lavori sul calcolo infinitesimale, introdotto da Isaac Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz verso la fine del XVII secolo, erano ben lontani dagli standard di rigore della matematica greca. In effetti i matematici facevano un uso ampio e acritico degli infinitesimi, enti che si immaginavano troppo piccoli per poter essere misurati. Talvolta essi erano considerati uguali a zero: per esempio, quando venivano sommati a un altro numero, il valore di quest'ultimo rimaneva immutato. In altri casi venivano ritenuti diversi da zero e utilizzati nelle divisioni. Guillaume François Antoine de l'Hôpital scriveva: «Una curva può essere considerata la totalità di un'infinità di segmenti rettilinei, ciascuno dei quali infinitamente piccolo, oppure... un poligono con un numero infinito di lati». Solo nel XIX secolo il francese Augustin-Louis Cauchy e il tedesco Karl Weierstrass resuscitarono il metodo di esaustione e diedero fondamenta sicure all'analisi matematica.

### *Infinito ed equinumerosità*

Grazie all'opera di Cauchy e Weierstrass, la maggior parte dei matematici si sentì meno minacciata dai paradossi di Zenone. All'epoca la preoccupazione maggiore era costituita da una famiglia di paradossi, risalenti al Medioevo, che riguardavano l'equinumerosità. Questi rompicapo derivano dal principio che se si può stabilire una corrispondenza biunivoca tra tutti i membri di un insieme e tutti quelli di un altro insieme, allora i due insiemi debbono avere ugual numero di membri. Per esempio, in una società in cui non viga la poligamia, debbono esistere tanti mariti quante sono le mogli. Questo principio sembra incontestabile ma, se applicato a insiemi infiniti, sembra farsi beffe di un'idea fondamentale dovuta a Euclide, ossia che il tutto è più grande di ogni sua parte. Per esempio, si possono mettere in corrispondenza biunivoca tutti gli interi positivi con tutti gli interi positivi pari: 1 è in corrispondenza con 2, 2 con 4, 3 con 6 e così via, sebbene i dispari siano solo un sottoinsieme degli interi positivi.

Nel Medioevo furono scoperti molti esempi simili, alcuni anche di natura geometrica. Nel XIII secolo il matematico scozzese John Duns Scoto rifletté sul caso di due cerchi concentrici: tutti i punti della circonferenza interna, più piccola, possono essere posti in corrispondenza con tutti i punti della circonferenza esterna. Questo risultato può essere generalizzato al caso di due sfere concentriche. Circa 350 anni più tardi Galileo discusse una variante della corrispondenza fra interi e interi pari, basata sui quadrati. Colpisce in particolare il fatto che, quanto più è lungo il tratto della successione degli interi positivi che si considera, tanto più si avvicina a zero la percentuale degli interi che sono quadrati. Tuttavia si può continuare indefinitamente a far corrispondere a un intero positivo il suo quadrato.

1 ↕ 1, 2 ↕ 4, 3 ↕ 9, 4 ↕ 16 ... $n$ ↕ $n^2$ ...

**Fra i membri di due insiemi equinumerosi vi è corrispondenza biunivoca, anche se questo principio sembra violato negli insiemi infiniti. Esiste una corrispondenza fra tutti gli interi quadrati e tutti gli interi positivi, anche se l'insieme dei quadrati pare più piccolo. Così, per due sfere concentriche, vi è corrispondenza biunivoca fra tutti i punti della superficie dell'una e tutti i punti della superficie dell'altra.**

Viste queste difficoltà, è forte la tentazione di espungere completamente gli insiemi infiniti. Più in generale si è tentati di negare, come fece Aristotele, la possibilità di raccogliere contemporaneamente un'infinità di cose. Alla fine, però, Cantor sfidò la concezione aristotelica affrontando brillantemente i paradossi e formulando una teoria coerente, sistematica e precisa dell'infinito attuale, pronta a sostenere qualsiasi sguardo scettico. Cantor accettò il principio della corrispondenza biunivoca e il suo inverso, cioè che non esistono due insiemi equinumerosi i cui membri non possano essere posti in corrispondenza biunivoca. Di conseguenza, ammise che esistono tanti interi positivi pari quanti sono gli interi positivi (e analoghe ammissioni fece per gli altri paradossi).

Per amor di discussione, e in ossequio alle convenzioni matematiche contemporanee, seguiamolo. Se questo principio significa che il tutto non è maggiore delle sue parti, ammettiamolo. In effetti possiamo usare quest'idea proprio per definire l'infinito, almeno nella sua applicazione agli insiemi: un insieme è infinito se non è più grande di una delle sue parti. Più precisamente, un insieme è infinito se ha tanti membri quanti ne ha almeno uno dei suoi sottoinsiemi propri.

Chiarito tutto in questo modo, resta una domanda aperta: tutti gli insiemi infiniti sono equinumerosi? L'influenza dell'opera di Cantor deriva in gran parte dall'aver dimostrato che la risposta a questa domanda è negativa. Vi sono infiniti di dimensioni diverse. Questa affermazione è conseguenza del teorema di Cantor: nessun insieme, e in particolare nessun insieme infinito, ha tanti membri quanti sono i suoi sottoinsiemi. In altre parole, nessun insieme è grande quanto l'insieme dei suoi sottoinsiemi. Perché no? Perché in caso contrario dovrebbe essere possibile mettere in corrispondenza biunivoca tutti i suoi membri con tutti i suoi sottoinsiemi. Alcuni dei suoi membri allora sarebbero in corrispondenza con sottoinsiemi che li contengono, mentre altri non lo sarebbero. Che cosa si potrebbe dire allora dell'insieme dei membri dell'insieme di partenza che non appartengono all'insieme con cui sono stati messi in corrispondenza biunivoca? Nessun membro dell'insieme di partenza può essere messo in corrispondenza con questo sottoinsieme senza contraddizione.

L'argomentazione può essere condensata in un diagramma; per comodità, mi concentrerò sull'insieme degli interi positivi. Posso rappresentare qualsiasi sottoinsieme dell'insieme degli interi positivi con una successione infinita di sì e no, che indicano se i vari interi positivi, presi nell'ordine naturale, appartengono o meno all'insieme. Per esempio, il sottoinsieme dei numeri pari potrebbe essere rappresentato dalla successione <no, sì, no, sì, no...>, corrispondente a 1, 2, 3, 4, 5 eccetera. Si può fare lo stesso per l'insieme degli interi dispari <sì, no, sì, no, sì...>, per quello dei numeri primi <no, sì, sì, no, sì...>, per quello dei quadrati <sì, no, no, sì, no...> e così via. In generale, quindi, qualsiasi assegnazione di sottoinsiemi diversi ai singoli interi positivi può essere rappresentata come un quadrato infinito di sì e no.

| | INTERI POSITIVI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SOTTOINSIEMI | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | . . . |
| INTERI PARI | NO | SÌ | NO | SÌ | NO | |
| INTERI DISPARI | SÌ | NO | SÌ | NO | SÌ | |
| PRIMI | NO | SÌ | SÌ | NO | SÌ | |
| QUADRATI | SÌ | NO | NO | SÌ | NO | |
| MULTIPLI DI 4 | NO | NO | NO | SÌ | NO | . . . |
| ⋮ | | | | | | |
| INSIEME DIAGONALIZZATO | SÌ | SÌ | NO | NO | SÌ | . . . |

**Il teorema di Cantor - secondo il quale non si può stabilire una corrispondenza biunivoca tra gli elementi di un insieme e i suoi sottoinsiemi - può essere dimostrato con la diagonalizzazione, che crea un nuovo sottoinsieme. Ogni sottoinsieme degli interi positivi è rappresentato da una successione di «sì» e «no». Un «sì» indica che il numero appartiene al sottoinsieme, un «no» che non vi appartiene. Sostituendo ogni «sì» con un «no» e viceversa, lungo la diagonale si crea (*in blu*) un altro sottoinsieme.**

Per dimostrare che esiste almeno un sottoinsieme che non compare in nessun punto di questo elenco di sottoinsiemi, creiamone uno nuovo tracciando la «diagonale» del quadrato e costruendo una nuova successione complementare alla diagonale, nella quale cioè quando sulla diagonale compare un «no» mettiamo un «sì» e viceversa. Nel caso illustrato, scriviamo <sì, sì, no, no...>. Il risultato è il sottoinsieme cercato: infatti, per costruzione, è diverso dal primo dei sottoinsiemi elencati per il primo elemento («sì» invece di «no»), dal secondo per il secondo elemento, dal terzo per il terzo elemento e così via. Una piacevole curiosità storica: lo studio di una diagonale aveva portato i pitagorici a dover riconoscere un infinito al di là della portata degli interi positivi, e lo studio di una diagonale ha portato Cantor al suo teorema.

In seguito Cantor introdusse i cardinali infiniti, numeri che possono essere utilizzati per misurare le dimensioni degli insiemi infiniti. Inventò anche una forma di aritmetica per questi numeri e, definiti i suoi termini, esplorò che cosa succede quando si sommano o si moltiplicano due cardinali infiniti, quando se ne eleva uno a potenza e così via. Il suo lavoro dimostrava una competenza matematica di altissima qualità; eppure rimaneva qualche difficoltà, la più nota delle quali è il problema del continuo. L'insieme degli interi positivi, abbiamo visto, è più piccolo dell'insieme di tutti gli insiemi di interi positivi. Ma quanto più piccolo? Specificamente, esistono insiemi di dimensioni intermedie?

### *L'ipotesi del continuo di Cantor*

L'ipotesi formulata da Cantor, la sua famosa «ipotesi del continuo», è che non esistono insiemi intermedi; tuttavia egli non riuscì mai a dimostrarla, né a confutarla. Studi successivi hanno rivelato che la situazione è di gran lunga più grave di quanto Cantor avesse immaginato. Pur utilizzando tutti i metodi accettati nella matematica moderna, non è stato possibile risolvere la questione. Questo problema solleva interrogativi filosofici sulla determinatezza della concezione di Cantor. Chiedersi se l'ipotesi del continuo sia vera può essere come chiedersi se Amleto fosse mancino: forse non ne sappiamo abbastanza per formulare una risposta. Se le cose stessero così, dovremmo chiederci fino a che punto il lavoro di Cantor riesca a domare l'infinito attuale.

Ancor più significativi sono i dubbi che riguardano l'insieme di tutti gli insiemi. Dato il teorema di Cantor, questa collezione deve essere più piccola dell'insieme di tutti gli insiemi di insiemi. Ma, un momento! Gli insiemi di insiemi sono a loro volta insiemi: perciò ne consegue che l'insieme di tutti gli insiemi deve essere più piccolo di uno dei suoi stessi sottoinsiemi propri. Questo, però, è impossibile. Il tutto può avere le stesse dimensioni di una sua parte, ma non può essere più piccolo di una sua parte. Come poté Cantor sfuggire a questa trappola? Con meravigliosa ostinazione, negò l'esistenza di una cosa come l'insieme di tutti gli insiemi. Il motivo sta nella sua concezione della natura

## La diagonalizzazione e il teorema di Gödel

Il procedimento di diagonalizzazione, che sta al cuore della dimostrazione del teorema di Cantor, è alla base anche del famoso teorema dimostrato nel 1931 dal matematico austriaco Kurt Gödel riguardante i sistemi formali dell'aritmetica. Per aritmetica si intende la teoria degli interi positivi e delle operazioni fondamentali che si applicano a essi, come l'addizione e la moltiplicazione.

Secondo il teorema, non esiste un sistema di leggi (assiomi e regole) abbastanza potente da dimostrare tutti gli enunciati veri dell'aritmetica che non sia al contempo tanto potente da «dimostrarne» anche alcuni falsi. Detto in forma diversa, ma equivalente, non esiste un algoritmo che permetta di stabilire, per ogni enunciato aritmetico, se è vero o falso. Per dimostrare il teorema di Gödel occorrono due definizioni e due lemmi. Non possiamo dare la dimostrazione dei due lemmi, nei limiti di questo articolo, ma di per sé costituiscono affermazioni alquanto plausibili.

*Definizione 1*: Un insieme di interi positivi è aritmeticamente definibile se può essere definito con la terminologia aritmetica standard. Tali sono, per esempio, l'insieme dei quadrati, l'insieme dei numeri primi e l'insieme degli interi positivi minori, poniamo, di 821.

*Definizione 2*: Un insieme di interi positivi è decidibile se esiste un algoritmo per stabilire se, dato un intero positivo, quell'intero appartiene o meno all'insieme. I tre insiemi citati sono esempi di insiemi decidibili.

Kurt Gödel, 1906-1978

*Lemma 1*: Esiste un metodo algoritmico per mettere in corrispondenza biunivoca interi positivi e insiemi aritmeticamente definibili.

*Lemma 2*: Ogni insieme decidibile è aritmeticamente definibile.

Dato il lemma 1, la diagonalizzazione fornisce un insieme di interi positivi che non è aritmeticamente definibile. Chiamiamolo *D*. Ora supponiamo che, contraddicendo il teorema di Gödel, esista un algoritmo per distinguere gli enunciati aritmetici veri da quelli falsi. Allora *D*, in virtù della sua costruzione, sarebbe decidibile. Ma, dato il lemma 2, questa proposizione contraddice il fatto che *D* non sia aritmeticamente definibile. Perciò il teorema di Gödel deve essere vero. c.v.d.

degli insiemi: vi sono cose che non sono insiemi, poi insiemi di tutte queste cose, poi insiemi di tutte queste altre cose e così via, senza fine. Ogni insieme appartiene a qualche altro insieme, ma non si arriva mai a un insieme a cui appartengano tutti gli insiemi.

Il ragionamento di Cantor può sembrare un po' *ad hoc*. Tuttavia un'argomentazione di questo tipo è necessaria, come ha messo in luce il famoso paradosso che Bertrand Russell formulò nel 1901. Questo paradosso riguarda l'insieme di tutti gli insiemi che non appartengono a se stessi: chiamiamolo *R*. L'insieme dei topi, per esempio, è un membro di *R*; infatti non appartiene a se stesso perché è un insieme, e non un topo. Il paradosso di Russell emerge quando ci si chiede se *R* appartenga o meno a se stesso. Se si appartiene, allora per definizione non appartiene a *R*. Se non si appartiene, allora soddisfa alla condizione per l'appartenenza a *R* e quindi si appartiene. In qualsiasi concezione degli insiemi c'è qualcosa di dubbio in *R*. Nella concezione di Cantor - in base alla quale nessun insieme appartiene a se stesso - *R*, se esistesse, sarebbe l'insieme di tutti gli insiemi. Questa argomentazione fa apparire più ragionevole l'idea di Cantor (con il conseguente rifiuto dell'esistenza di *R*).

Ma questa idea non è straordinariamente aristotelica? Notate la metafora temporale. Gli insiemi, si dice, vengono in essere «dopo» i loro membri, così che ce ne sono sempre di là da venire. La loro infinità collettiva, di contro all'infinità di ciascuno singolarmente, è potenziale, non attuale. Inoltre, questa infinità collettiva non è proprio quella che può avanzare le migliori pretese al titolo? Comunemente si immagina l'infinito come qualcosa che non ha fine, non ha limiti, non può essere passato completamente in rassegna e non è misurabile. Pochi ammetterebbero che la definizione tecnica di insieme infinito esprima la loro comprensione intuitiva del concetto. Ma, data la rappresentazione cantoriana, la mancanza di fine, di limiti, l'impossibilità a essere passato in rassegna e la non misurabilità si applicano più correttamente a tutta la gerarchia che non ai singoli insiemi particolari che la formano.

In qualche senso, quindi, Cantor ha dimostrato che l'insieme degli interi positivi, per esempio, è «in realtà» finito e che ciò che è «realmente» infinito è qualcosa che va molto al di là. (Cantor stesso non era alieno dall'esprimersi in questi termini.) Per ironia, sembra che la sua opera abbia dato ampia sostanza alla concezione aristotelica ortodossa secondo cui l'infinito «reale» non può mai essere attuale.

Alcuni studiosi hanno obiettato alla mia proposta controintuitiva che, nella concezione di Cantor, l'insieme degli interi positivi sia «realmente» finito; e tuttavia la maggior parte delle persone negherebbe anche che un insieme infinito possa essere più grande di un altro. Il punto non è quel che i più direbbero, bensì come intendano i loro termini, e come questa comprensione sia in grado di ridurre il meglio possibile l'impatto sconvolgente dei risultati di Cantor. Nulla ci costringe a prender posizione in un senso o nell'altro. Possiamo dire che alcuni insiemi infiniti sono più grandi di altri. Possiamo dire che l'insieme degli interi positivi è solo finito. Possiamo astenerci da ambedue queste affermazioni e negare che esista l'insieme degli interi positivi.

Se il nostro compito è articolare taluni risultati matematici standard, non consiglierei altro che l'uso della terminologia matematica standard. Ma vorrei esortare matematici e altri scienziati a usare maggiore cautela del solito quando valutano l'importanza dei risultati di Cantor per le concezioni tradizionali dell'infinito. Il vero infinito, sembra, rimane ancora molto al di là della nostra comprensione.


### BIBLIOGRAFIA

ZELLINI P., *Breve storia dell'infinito*, Adelphi, Milano, 1980.

MAOR ELI, *To Infinity and Beyond: A Cultural History of the Infinite*, Birkhauser, 1986.

MOORE A. W., *The Infinite*, Routledge, Londra, 1990.

RUCKER RUDY, *La mente e l'infinito. Scienza e filosofia dell'infinito*, Muzzio, Padova, 1991.

MOORE A. W. (a cura), *Infinity*, Dartmouth, 1993.

LAVINE SHAUGHAN, *Understanding the Infinite*, Harvard University Press, 1994.

# L'organizzazione politica in una città mesopotamica

*Gli scavi di Mashkan-shapir, per breve tempo una delle più importanti città del mondo, suscitano dubbi sulla visione tradizionale della distribuzione del potere nelle prime società urbane*

di Elizabeth C. Stone e Paul Zimansky

I resti delle più antiche città del mondo sono la caratteristica saliente del paesaggio dell'Iraq meridionale, e ormai da quasi due secoli gli archeologi li esplorano e si interrogano sugli oggetti qui ritrovati. Formatisi nel corso di cinque millenni e mezzo di occupazione intermittente, questi *tell* - collinette costituite dalle macerie delle antiche città e dai manufatti a esse associati - possono avere un diametro anche di un chilometro e mezzo; alcuni si levano di oltre 30 metri al di sopra della pianura. Babilonia, Ur, Uruk, Nippur e Kish hanno fornito una ricca documentazione della cultura materiale mesopotamica nonché, grazie al supporto relativamente non deperibile utilizzato allora per scrivere (le tavolette d'argilla), dettagliate testimonianze scritte sulle istituzioni politiche, culturali, religiose e sociali.

Tuttavia l'organizzazione fisica e sociale di questi antichissimi centri urbani è ancora in gran parte sconosciuta, per una varietà di motivi. Paradossalmente, la nostra ignoranza è in parte dovuta proprio all'immensa ricchezza della documentazione: i tell sono così enormi che anche le spedizioni meglio dotate di finanziamenti possono scavare solo una frazione minuscola di ciascuna città. Un impedimento più grave è dato dal fatto che la disposizione degli edifici ritrovati in uno scavo generalmente non rappresenta il volto reale di una città in un particolare momento. Gli antichi abitanti riutilizzavano continuamente le strutture più antiche oppure le demolivano o le modificavano. Si può immaginare che gli archeologi che fra qualche migliaio di anni tenteranno di studiare una città come Londra si troveranno di fronte a un problema simile: scopriranno infatti mescolati tra loro i resti di grattacieli moderni, di edifici vittoriani, di castelli normanni e persino di un campo militare romano; ricostruire la città come appariva in un dato periodo storico sarà estremamente arduo.

Si è osservato da molto tempo che le piante delle città moderne riflettono schemi di organizzazione sociale; il nostro studio di antiche città non mesopotamiche dimostra che si può trarre una conclusione simile anche per i primi siti urbani. Laddove il potere è strettamente concentrato e basato sulla coercizione, i centri amministrativi, religiosi, produttivi e commerciali tendono a raggrupparsi, circondati dalle residenze dell'*élite*. Al contrario, le società in cui il controllo è condiviso da diversi gruppi e le decisioni vengono prese a vari livelli della gerarchia sociale mostrano ben poche tracce di una simile concentrazione. In queste città decentralizzate, gli stretti legami fra l'élite e il resto della popolazione sono rispecchiati dalla presenza in ciascun quartiere residenziale di abitazioni sia ricche che povere.

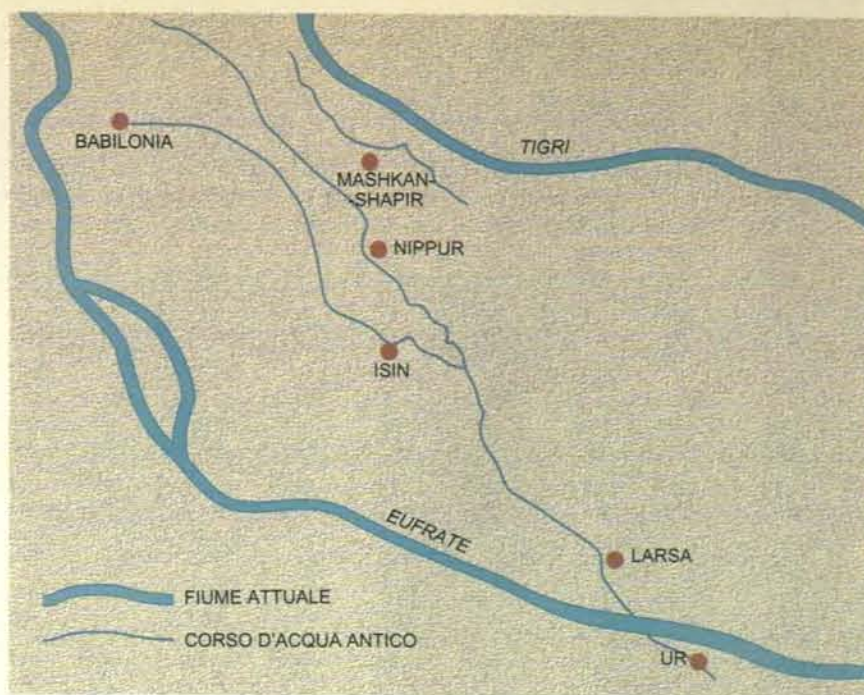
Presso quale di questi estremi si collocano i primi centri urbani della Mesopotamia? Gli archeologi ne hanno tradizionalmente sostenuto la natura centralizzata, ma un attento esame delle loro ipotesi, combinato con le nostre recenti scoperte a Mashkan-shapir, indica che questa concezione va rivista. Il fatto che i primi scavi in Mesopotamia si siano concentrati su sedi di prestigio e potere - palazzi e templi - portò ad adottare una visione alquanto ristretta della società che le aveva costruite. L'eccessiva attenzione rivolta alle testimonianze materiali del potere ha portato a trascurare il fatto che i testi mesopotamici non parlino di classi sociali chiaramente differenziate; al contrario, essi documentano che un ruolo importante nel prendere decisioni era svolto da organismi assembleari.

Può darsi che la concezione tradizionale sia in parte dettata da pregiudizi meno evidenti. Gli storici riconoscono che l'industria e il capitalismo hanno trasformato così radicalmente il mondo che oggi non c'è un analogo delle città antiche. Tuttavia alcuni sono stati forse troppo pronti nel postulare un modello unitario di «città preindustriale», basato su pochi esempi, anziché considerare un'ampia gamma di possibili organizzazioni urbane. Nel costruire questo modello, solo raramente essi hanno guardato al di là dell'antica Grecia, e talvolta addirittura dell'Europa medievale.

Il risultato di tutto ciò è che in effetti si è dato per scontato che le città mesopotamiche siano state modellate dalle stesse forze che agirono sui centri urbani più tardi dell'Europa, in particolare una base agricola stabile e un valore fisso dato a ogni appezzamento di terreno. In realtà, in Mesopotamia, la base economica era tutt'altro che geograficamente stabile, come dimostra l'importanza dell'allevamento nomade. Anche le zone coltivate non erano permanenti: le inondazioni annuali, l'alta velocità di evaporazione e la rapida salinizzazione del suolo portavano alla formazione di un mosaico continuamente variabile di fertili campi irrigati e orti alternati a tratti desertici o paludosi; in questa situazione la ricchezza e il potere avevano ben poco a che fare con il controllo permanente di un particolare appezzamento. Descrizioni dettagliate di molte civiltà urbane preindustriali - in Africa occidentale, nel Medio Oriente islamico e nel Nuovo Mondo all'epoca della conquista spagnola - indicano che vi era una considerevole variabilità nell'organizzazione; fanno anche pensare che esistesse un legame fra permanenza dei terreni agricoli e grado di centralizzazione sociale e politica. Non vi è quindi alcuna ragione per assumere a priori che le città mesopotamiche dovessero essere particolarmente centralizzate.

Il progetto archeologico che ha condotto alla scoperta di Mashkan-shapir è il risultato della nostra decisione di affrontare questo problema studiando un sito occupato solo durante un singolo periodo. Le rovine di un insediamento così effimero ci avrebbero fornito una immagine di organizzazione urbana la cui analisi avrebbe potuto permetterci di stabilire se la forza predominante nel modellare il volto della città fosse stata la coercizione élitaria o la cooperazione fra diversi segmenti sociali. Quello che cercavamo era un sito di scala urbana, ma molto diverso dalle grandi città che erano state studiate in precedenza: occupato per un

**Al suo apogeo, verso il 2000 a.C., Mashkan-shapir era la seconda capitale del regno mesopotamico, che aveva il suo centro a Larsa. Attività politiche, commerciali e produttive e cerimonie religiose avvenivano nell'ambito di una società che, secondo gli autori, si basava più sulla cooperazione che sulla coercizione. Mutamenti delle alleanze locali portarono, circa 200 anni dopo, all'abbandono di Mashkan-shapir; oggi la città, come si può vedere nella fotografia, è quasi totalmente scomparsa.**

**L'antica Mesopotamia comprendeva la regione che si stende fra i fiumi Tigri ed Eufrate, nell'attuale Iraq. Mashkan-shapir assurse a un ruolo importante per la sua collocazione strategica presso il Tigri; controllava infatti il trasporto delle merci provenienti da nord lungo il corso d'acqua. Nella fotografia da satellite si vede la posizione di Mashkan-shapir (*in verde*) con i suoi canali e il letto del Tigri all'epoca dello splendore della città.**

breve periodo e poi lasciato pressoché indisturbato dopo l'abbandono.

I dati raccolti da altri studiosi sulla distribuzione degli insediamenti antichi in Iraq ci hanno permesso di scegliere un sito - ancora senza nome - scoperto negli anni settanta da Robert McC. Adams, allora all'Università di Chicago.

La nostra visita preliminare, nel gennaio 1987, avvenne in circostanze non certo ideali, dato che coincise con il primo giorno dell'«offensiva finale» lanciata dagli iraniani nella guerra Iran-Iraq. Il sito era letteralmente cosparso di segni di occupazione. Lembi di mura, frammenti di ceramica, tombe e persino antichi canali erano chiaramente visibili in un'area di diametro poco inferiore al chilometro. La maggior parte dei cocci risaliva al primo quarto del II millennio a.C. Sia la quantità sia la qualità dei resti indicavano che gli unici visitatori recenti, gruppi di beduini con i loro cammelli, li avevano lasciati in gran parte indisturbati.

Il sito rimase anonimo per altri due anni mentre prendevamo accordi in vista del nostro ritorno. Poi, nel 1989, poco dopo l'inizio della spedizione, trovammo fortuitamente, presso i resti di una delle porte della città, un frammento di argilla cotta recante un'iscrizione cuneiforme. In breve tempo portammo alla luce altri 150 pezzi analoghi che, una volta ricomposti, formarono molteplici copie di un'iscrizione commemorativa della costruzione delle mura. Sul terzo frammento esaminato vi erano tre segni chiaramente leggibili dei quattro che formano la parola «Mashkan-shapir»: il nome di una città che fu, sia pure per breve tempo, una delle più importanti del mondo.

Mashkan-shapir compare nella documentazione storica verso la fine del III millennio a.C., come un piccolo villaggio dedito all'allevamento ovino ai margini del bacino mesopotamico. Probabilmente sarebbe rimasto relegato a un ruolo secondario se le trame politiche dell'inizio del II millennio non avessero rovesciato la situazione. Poco prima del 2000 a.C. vi fu il crollo di un impero che aveva avuto il suo centro a Ur e aveva controllato l'intera pianura alluvionale. Nei due secoli successivi diverse città lottarono per la supremazia, in primo luogo Isin e Larsa. Quest'ultima era probabilmente la più potente, ma Isin si trovava più a monte sull'Eufrate e quindi poteva impedire alla rivale di accedere a risorse essenziali come legno, metalli e pietra, che venivano trasportate sul fiume provenendo da nord-ovest. Larsa fece una contromossa, assumendo il controllo della parte orientale della valle e assicurandosi l'accesso al Tigri. Essendo l'avamposto più settentrionale di Larsa, Mashkan-shapir crebbe velocemente fino ad assumere le dimensioni di un centro urbano e a divenire infine la seconda capitale del regno.

La città mantenne questo ruolo anche dopo la sconfitta di Isin, perché l'ascesa di Babilonia sotto Hammurabi, all'inizio del XVIII secolo a.C., creò una analoga competizione per il controllo delle risorse. Ben presto le conquiste di Hammurabi, che portarono all'unificazione di gran parte della Mesopotamia meridionale, resero irrilevante la posizione strategica di Mashkan-shapir. La città fu abbandonata verso il 1720 a.C. e le sue vie d'acqua caddero in disuso. Mashkan-shapir scomparve nel deserto.

Vi sono ampie testimonianze storiche che ci permettono di ricostruire il carattere della città durante la sua breve fioritura. Come seconda capitale, era un centro politico dove si svolgeva un'intensa attività diplomatica; era anche una porta d'accesso alla via commerciale che risaliva il Tigri e, infine, ospitava uno dei principali santuari di Nergal, divinità fra le più potenti del pantheon mesopotamico. Dato che le attività amministrative, religiose e commerciali erano preminenti anche in altre città mesopotamiche, non è arbitrario sostenere che l'organizzazione di Mashkan-shapir possa fungere da modello anche per quella di altri siti.

Le nostre possibilità di lavoro sul campo sono state limitate sia dal tempo necessario per ottenere finanziamenti sufficienti per una permanenza prolungata, sia dalle vicissitudini politiche della regione. Le prime esplorazioni sono state condotte in due campagne di tre settimane ciascuna nel 1987 e nel 1989; poi, da gennaio a maggio 1990, siamo stati in grado di lavorare continuativamente sul sito grazie al sostegno della National Science Foundation, del National Endowment for the Humanities, della National Geographic Society e delle American Schools of Oriental Research. Abbiamo condotto una completa ricognizione superficiale e aerea per cartografare le principali strutture del sito, completandola con sondaggi a piccola scala, che ci hanno consentito di determinare il rapporto fra tracce superficiali e resti sepolti. Ci siamo anche serviti di immagini da satellite per ricostruire la situazione geologica della zona.

Dopo il termine della prima fase del progetto e il nostro ritorno negli Stati Uniti, l'invasione del Kuwait da parte dell'Iraq mise fine a tutte le ricerche archeologiche condotte da stranieri. Speriamo un giorno di poter tornare e applicare le conclusioni che abbiamo tratto dalle ricerche preliminari allo scavo di specifiche strutture che possano chiarire l'organizzazione di questa antica città.

Tracciare una mappa di Mashkan-shapir non è stato facile, dato che i suoi resti non formano un vero e proprio tell. Il sito è stato gravemente eroso dal vento, che ha ridotto gli edifici alle semplici fondamenta e ha lasciato i manufatti più pesanti esposti alla superficie. Solo in alcuni punti il livello del sito sovrasta di più di due metri quello della pianura.

In conseguenza di ciò, i caratteri architettonici principali, come il tracciato delle mura di cinta, erano difficili da riconoscere stando a terra: in effetti, per gran parte della loro circonferenza le fortificazioni di Mashkan-shapir sono visibili solo dall'alto, e in alcuni punti sono totalmente scomparse. La ricognizione aerea è stata quindi essenziale per il nostro lavoro. Abbiamo sfruttato i forti venti che spirano sul sito utilizzando per i nostri scopi un aquilone su cui era montato un apparecchio fotografico. Dato che la quota dell'aquilone dipendeva dalla velocità del vento, l'area compresa in ciascuna immagine variava notevolmente. Abbiamo fatto il possibile per compensare queste irregolarità scattando molte fotografie e badando che vi fosse un elevato grado di sovrapposizione fra di esse.

Le 1600 fotografie aeree da noi ottenute non sarebbero state molto utili per la mappatura di Mashkan-shapir se non avessimo potuto disporre di software specificamente progettato per facilitare l'analisi delle immagini da satellite e produrre mappe da utilizzare in studi urbanistici e geografici. Avevamo contrassegnato i vertici dei riquadri della nostra griglia di ricognizione, ognuno dei quali misurava 50 metri di lato, con croci che risultavano visibili nelle fotografie, permettendo così di orientare le immagini e compensare le distorsioni geometriche dovute alle oscillazioni dell'apparecchio. Versioni digitalizzate delle immagini sono state corrette, portate alla medesima scala e poi composte in un mosaico sufficientemente dettagliato da mostrare la posizione di ciascun mattone alla superficie del sito.

Abbiamo combinato la ricognizione aerea con un'esplorazione sul terreno, basata sulla stessa griglia di 50 metri di lato. Un componente del nostro gruppo percorreva ciascun riquadro, seguendo un cammino pensato in modo da non trascurarne alcuna parte e contrassegnando con «bandierine» le strutture e i manufatti principali. Frammenti sparsi di mattoni, cocci, scorie della lavorazione del rame e della ceramica, frammenti di fornaci e pezzetti di bitume sono stati indicati sulla nostra mappa in termini di concentrazioni anziché di singoli pezzi, essendo troppo numerosi per permettere un conteggio. Da campionature di aree limitate, stimiamo che in superficie vi siano almeno 30 milioni di frammenti di ceramica di dimensioni superiori a uno o due centimetri.

Nel corso della ricognizione abbiamo anche rilevato sepolture, piattaforme di mattoni cotti e crudi, sponde di canali e tracce delle mura, oltre a localizzare più di 1200 singoli oggetti: attrezzi, armi, gioielli, frammenti di statue, placchette, figurine, modellini e recipienti interi. La distribuzione variabile dei manufatti testimonia la complessità di questo effimero centro urbano.

Per avere un'idea più articolata del paesaggio intorno a Mashkan-shapir, abbiamo fatto ricorso a un'immagine ottenuta nel maggio 1988 da un satellite francese SPOT per il telerilevamento. Essa rivela che un antico letto del Tigri passava accanto al sito, mentre oggi il corso d'acqua più vicino dista non meno di una trentina di chilometri. L'immagine mostra anche il percorso di una serie di canali che prendevano origine dal fiume e attraversavano la città.

Da queste scoperte siamo riusciti a dedurre parecchie cose sulla vita a Mashkan-shapir. Come tutte le città mesopotamiche coeve, essa era circondata da mura di mattoni crudi in cui si aprivano varie porte. Ne abbiamo identificate tre; due servivano per il traffico su strada ed erano situate presso canali importanti, presumibilmente perché, allora come oggi, le strade fiancheggiavano i corsi d'acqua che fungevano da fondamentali vie di comunicazione. La terza porta scavalcava un canale; forse serviva per regolare il flusso dell'acqua oppure il traffico di imbarcazioni.

Una osservazione sorprendente è che le mura non erano sempre costruite al margine di zone densamente edificate. Un'ampia area situata fra l'insediamento e le mura conteneva solo sei edifici isolati che sembra fossero magazzini. Da molti testi mesopotamici si deduce che lo scambio di merci avveniva presso le porte cittadine, e quindi è possibile che questo spazio servisse da mercato. Un'altra zona apparentemente non occupata, presso un canale, era forse un giardino. Sappiamo che in alcune città mesopotamiche erano presenti giardini perché una pianta di Nippur, graffita su una tavoletta di alcuni secoli posteriore, ne mostra uno piuttosto grande in un angolo della città.

La città vera e propria era suddivisa in cinque quartieri separati da canali: una zona a forma di quadrilatero nel centro era circondata da quattro aree più ampie a nord, sud, est e ovest (*si veda l'illustrazione a pagina 86*). I quartieri settentrionale e orientale, che erano i più grandi, erano a loro volta percorsi da vie d'acqua. Vaste strutture portuali occupavano due incroci fra canali; senza dubbio si trattava di zone destinate al commercio.

Molti degli edifici erano allineati lungo le vie d'acqua, che costituivano così parte integrante del tessuto urbano. Mashkan-shapir non è la sola città mesopotamica nota ad avere una simile configurazione, ma in altri siti la rete di canali è scarsamente riconoscibile a causa del notevole spessore dei depositi che li hanno colmati. Le strade, che altrove sono anch'esse ricoperte di detriti,

risultano a mala pena visibili a Mashkan-shapir. Alcune seguono i canali, mentre altre percorrono l'interno dei quartieri; in una di queste, nel punto in cui la strada incrocia un canale, si possono vedere le tracce di un ponte di mattoni cotti (o forse di due imbarcaderi). Lo scavo di altre città mesopotamiche ha dimostrato che le vie principali erano integrate da una rete di vicoli che davano accesso alle singole abitazioni.

Le fotografie aeree rivelano ulteriori demarcazioni. Una parte del quartiere occidentale era cinta da mura, e un altro muro attraversava la zona meridionale del quartiere centrale. Entrambi sono simili alle mura interne di Ur, che delimitavano lo spazio consacrato intorno ai templi principali.

Come si inserivano le funzioni politiche, religiose, economiche e sociali di Mashkan-shapir nella struttura urbanistica definita da strade, canali e mura interne? L'esame delle rovine ha permesso di stabilire dove si svolgevano le attività.

Il tempio principale di Mashkan-shapir - quello di Nergal - doveva essere visivamente il punto focale della città. Sopraelevato su una piattaforma o ziggurat, poteva essere visto da chilometri di distanza e, come una cattedrale nel Medioevo, era un simbolo di potere. I resti delle piattaforme in mattoni cotti e crudi che sembra facessero da basi per i santuari più importanti si trovavano nella parte meridionale della città, in una zona delimitata da un canale. Il carattere religioso di queste strutture è dimostrato dalla scoperta di 70 frammenti di statue in terracotta a grandezza naturale rappresentanti esseri umani, leoni, cani e cavalli. All'epoca di Mashkan-shapir, statue di leoni adornavano spesso gli ingressi di templi anche secondari, ma figure umane e animali più complesse erano state trovate in precedenza solo in siti di grande importanza come Isin.

Oltre il canale, nel quartiere centrale, vi era un'altra zona a carattere religioso, identificabile grazie all'unica piattaforma scoperta finora fuori dell'area cultuale. In questa zona, separata dal resto dell'insediamento con un muro di cinta, vi sono tracce di numerose sepolture e una concentrazione di offerte funebri come gioielli e armi. Dato che la maggior parte delle sepolture in altri siti mesopotamici (e questo è spesso vero anche a Mashkan-shapir) si trova in aree residenziali, questa scoperta fa pensare che un segmento della società - forse associato al centro religioso o a quello amministrativo - disponesse di un cimitero proprio, probabilmente con un tempio annesso.

Una terza zona, ben caratterizzata e circondata da mura, sorgeva nella parte occidentale della città; riteniamo che si trattasse di un centro amministrativo. Al suo interno vi era una serie di strutture molto regolari, assai dissimili dalle abitazioni private disposte in maniera più disordinata. Sebbene le strutture indubbiamente non facciano parte di un palazzo come quello di Mari, che risale alla stessa epoca, probabilmente svolgevano funzioni amministrative almeno in parte analoghe. Come i palazzi scoperti in altre città, questa zona di Mashkan-shapir si trova alla periferia del sito. Inoltre, nel 1990, abbiamo rinvenuto negli edifici della cinta numerosi blocchetti di argilla cruda recanti impressioni di sigilli in pietra: essi venivano fissati a corde che chiudevano le porte o erano inseriti nel materiale che sigillava i recipienti per l'immagazzinaggio, allo stesso modo in cui si chiude una lettera con un sigillo di ceralacca; non avevano quindi alcuna funzione in un contesto domestico.

Nell'esplorazione della cinta abbiamo anche fatto una scoperta bizzarra: un gruppo di modellini di carri ornati con rappresentazioni dei protettori della città, Nergal e Shamash. È difficile stabilire con certezza quale fosse la funzione di questi piccoli veicoli a due ruote, ma la loro abbondanza in un ambiente ufficiale fa pensare che non fossero giocattoli. Una possibile interpretazione è che servissero a simboleggiare la presenza degli dei durante atti di valore legale come un impegno giurato.

**L'area urbana di Mashkan-shapir, che si estendeva per circa un chilometro quadrato, era suddivisa da canali in cinque «quartieri». Le testimonianze delle attività religiose e amministrative sono state rinvenute alla periferia del sito. Le botteghe per la lavorazione della pietra, del rame e della ceramica erano sparse in tutta la città, anziché essere concentrate in un solo settore; i ramai erano distribuiti lungo la via principale del quartiere centrale. Questa distribuzione, relativamente uniforme, implica che a Mashkan-shapir le differenti classi sociali vivessero per lo più a fianco a fianco.**

La nostra indagine non ci ha permesso di identificare altre aree di Mashkan-shapir aventi carattere specializzato. In ogni altro punto della città i ritrovamenti possono essere definiti di tipo domestico: figurine, piccoli arnesi e armi, gioielli comuni (come anelli di conchiglia) e resti di abitazioni e sepolture.

Le strade e i canali principali probabilmente suddividevano questo grande spazio urbano in zone residenziali che però non si differenziavano per ricchezza e prestigio. Coppe di pietra e oggetti di metallo (che erano fatti con materiali importati e rappresentavano un significativo investimento di mano d'opera) erano sparsi uniformemente; se fossero stati più comuni in un'area piuttosto che in un'altra, si sarebbe potuta presumere l'esistenza di zone residenziali di lusso. Anche i sigilli cilindrici - che erano emblemi ufficiali e nello stesso tempo oggetti di considerevole valore intrinseco - avevano una distribuzione uniforme.

Così pure abbiamo scoperto che le attività produttive avevano sede in ogni settore della città. Sembra che vi fosse una certa concentrazione di industria «pesante», come la fusione del rame e la produzione di ceramica, nella parte sudorientale, che si trovava sottovento, ma per lo più gli artigiani lavoravano in edifici circondati da altre abitazioni. Nessuna parte della città poteva essere definita «distretto produttivo». I ramai - le cui botteghe erano contraddistinte da una concentrazione di scorie di rame - lavoravano, per esempio, lungo la strada principale del quartiere centrale, mentre la maggior parte dei frammenti di pietre decorative e le botteghe dei tagliapietre erano localizzati nel settore sudorientale. Vi erano due centri di produzione della ceramica (segnalati da residui di lavorazione e frammenti di fornaci), uno nella zona settentrionale e uno in quella orientale; entrambi si concentravano intorno ai canali minori che attraversavano queste aree. Nel complesso, la localizzazione delle attività produttive conferma l'ampio decentramento che si può dedurre dalla distribuzione delle case e dei reperti.

**I reperti portati alla luce a Mashkan-shapir testimoniano le diverse attività che si svolgevano nella città. Il cilindro in cornalina (*a*), un materiale importato, veniva utilizzato per sigillare documenti ufficiali. Modellini di carri (*b*) servivano forse a simboleggiare la presenza divina al momento di atti di valore legale. L'arpione in rame (*c*) veniva usato per pescare nei canali e nel fiume; la placchetta in terracotta ornata con un leone (*d*) decorava un edificio.**

I risultati da noi ottenuti a Mashkan-shapir non sembrano dunque sostenere la teoria che le città mesopotamiche e la loro organizzazione sociale fossero altamente centralizzate. È vero che abbiamo chiaramente identificato centri religiosi e amministrativi, ma erano relegati nella parte meridionale del sito; anzi, erano separati fra loro e dal resto della città da ampi canali. Inoltre questi ipotetici centri di potere erano lontani dalle zone dove si svolgeva il commercio, ossia i porti e gli ingressi alla città. Sembra che la produzione di beni fosse affidata ad artigiani che vivevano in quartieri residenziali, in cui si mescolavano classi sociali abbienti e modeste.

Nel complesso l'organizzazione di Mashkan-shapir conferma le fonti scritte che indicano un ampio coinvolgimento degli abitanti delle città mesopotamiche nel definire l'organizzazione locale del potere. Questa conclusione potrebbe estendersi a sua volta a strutture sociali più antiche: se nel periodo babilonese antico, quando Mashkan-shapir prosperò, i cittadini vivevano in un sistema relativamente decentralizzato, ci sembra improbabile che in epoche precedenti l'autorità locale fosse più saldamente nelle mani di una piccola élite. Dai nostri studi quindi non si ricava alcuna conferma dell'ipotesi che le origini della civiltà vadano cercate in processi di conquista e coercizione.

**BIBLIOGRAFIA**

ROAF MICHAEL, *Cultural Atlas of Mesopotamia and the Ancient Near East*, Facts on File, 1990.

STONE E. C., *The Tell Abu Duwari Project, Iraq, 1987* in «Journal of Field Archaeology», 17, n. 2, estate 1990.

POSTGATE J. NICHOLAS, *Early Mesopotamia: Society and Economy at the Dawn of History*, Routledge, 1992.

STONE E. C. e ZIMANSKY P., *The Tell Abu Duwari Project, 1988-1990* in «Journal of Field Archaeology», 21, n. 4, 1994.